Niveau(x) d'enseignement: 7 Numéro EDUQ : 8970265
Centre d'intérêt: 874

Bock, Wojtek J.

Laboratoire d'optoélectronique. Cahiers d'expériences / [Wojtek J. Bock]. -- [Hull] : Université du Québec à Hull, c1989.
125 f. en foliotation multiple : ill. ; 28 cm + guide pédagogique (99 f. : ill.).

En tête du titre: Programme Recherche-développement pour les formateurs.
Bibliogr.: Guide pédagogique, f. 99.

Vedette(s)-secondaire(s): Université du Québec à Hull

Descripteur(s): Techniques physiques • Cahier d'exercices • Guide pédagogique • Manuel scolaire • Collégial (Ordre d'enseignement)

Identificateur(s) de sujet: Electrotechnique • Optique des fibres • Optoélectronique

---

Ce cahier comprend dix expériences sur les systèmes de communication par fibres optiques. Chaque expérience à réaliser est précédée d'un exposé sur la théorie qu'elle implique. Les expériences sont groupées sous trois thèmes: notions scientifiques de base, fonctionnement des dispositifs optoélectroniques et applications pratiques. Le "guide pédagogique" qui accompagne le cahier d'expériences peut être considéré comme un exposé théorique sur l'optique des fibres.

Type de document: r
Notice(s) connexe(s): 8970013

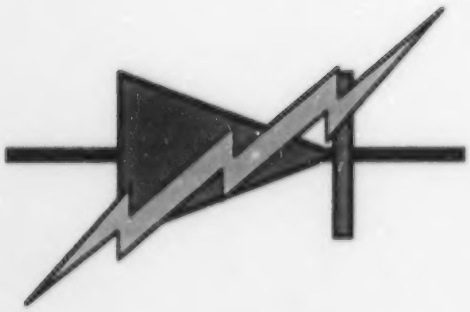
LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE

Université
du Québec à Hull

Wojtek J. B[illegible]

Guide pédagogique

Programme RECHERCHE-DÉVELOPPEMENT
POUR LES FORMATEURS



LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE

Cette recherche a été réalisée grâce à une subvention accordée par le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Science du Québec.

Fruit d'un travail collectif, cet ouvrage a bénéficié en particulier du concours des chercheurs de l'Université du Québec à Hull, des enseignants de la polyvalente Mont-Bleu et de la société Bell-Northern Research.

À tous ceux qui ont collaboré à l'élaboration et à la réalisation de ce projet, l'auteur tient ici à exprimer ses sincères remerciements et plus particulièrement aux personnes suivantes:

Mario Beaulieu (UQAH)
Jean-Marc Deslauriers (polyvalente Mont-Bleu)
Lucjan Grochowski (UQAH)
Janguy Perry (UQAH)
Marek Wernik (BNR)

Copyright © 1989 Wojtek J. Bock

TABLE DES MATIÈRES

PAGE

I. INTRODUCTION 4

II. VOCABULAIRE RELATIF À L'OPTOÉLECTRONIQUE 7

III. BREF HISTORIQUE DE LA COMMUNICATION OPTIQUE . . . 18

IV. OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE ET FIBRES OPTIQUES 19

1. La lumière comme onde électromagnétique 19
2. Propagation dans les matériaux 21
3. Interprétation géométrique de la propagation dans les fibres optiques 24

V. PHÉNOMÈNES ONDULATOIRES DANS LES FIBRES OPTIQUES 29

1. Champs ondulatoires dans une fibre 29
2. Modes de propagation 32
3. Polarisation des ondes 35
4. Interférence 36
5. Cohérence 38

PAGE

VI. PROPAGATION DES SIGNAUX ET PROPRIÉTÉS DES FIBRES 41

1. Généralités 41
2. Pertes 43
3. Dispersion 47
4. Procédés de fabrication des fibres optiques 50

VII. CÂBLES ET CONNECTEURS 54

1. Câbles optiques 54
2. Connecteurs 57
3. Coupleurs optiques 61

VIII. LASERS 63

1. Lasers à semiconducteurs - introduction 63
2. Diodes électroluminescentes 69
3. Diodes lasers 71
4. Lasers à He-Ne 74

IX. PHOTODÉTECTEURS 75

1. Généralités 75
2. Les divers types de photodiodes 77

PAGE

X. MODULATION DE LA LUMIÈRE 80

1. Généralités 80
2. Modulation directe 80
3. Modulation électro-optique 81
4. Modulation acousto-optique 82

XI. LIAISONS PAR FIBRES OPTIQUES 83

1. Généralités 83
2. Décomposition de la liaison 84
3. Distribution des données 85

XII. MULTIPLEXAGE 91

1. Généralités 91
2. Multiplexage temporel 93
3. Mutiplexage en longueur d'onde 96

BIBLIOGRAPHIE 99

Chapitre I

INTRODUCTION

L'optoélectronique est une nouvelle discipline née des progrès récents et rapides de la technologie optique, surtout dans le domaine des fibres optiques et de leurs applications à la télécommunication et à la communication locale. L'avancement de la technologie du silice dans l'industrie électronique a accéléré le développement des fibres optiques à pertes faibles et, par la suite, celui de systèmes entiers de communication. Un autre facteur a été les progrès en matière de sources (diodes Lasers DL et diodes luminescentes DEL) et de détecteurs à semiconducteur conçus spécialement pour satisfaire les besoins spécifiques des systèmes de transmission par fibres optiques.

Dans un système optoélectronique de communication, l'information est transmise par un guide d'ondes (la fibre optique) sous forme d'impulsions lumineuses. Elle est cependant engendrée, traitée et stockée à l'intérieur de dispositifs spécialisés à semiconducteur à l'aide d'interactions spécifiques entre les électrons et les photons.

Des liaisons en fibres optiques vont bientôt remplacer les systèmes de communication basés sur la technologie du cuivre. Une telle transformation est inévitable, et ce, pour deux raisons bien simples: d'une part des liaisons en fibres optiques sont capables de fonctions que la technologie du cuivre ne permet pas; d'autre part, les fibres optiques sont déjà ou deviendront prochainement moins chères que leurs analogues en cuivre.

De nos jours, la véritable justification de l'usage, déjà consacré, des liaisons en fibres optiques est que celles-ci sont totalement insensibles aux interférences électromagnétiques (EMI) et radio (RFI). Même les câbles concentriques en cuivre sont sensibles à cette interférence, ce qui dans le cas des guides diélectriques (fibres optiques) est exclus par leur nature propre. Dans des environnements caractérisés par un niveau de bruit élevé, comme dans les usines équipées de matériel lourd ou dans les installations militaires, on préfère des liaisons en fibres optiques même lorsque cette option est plus coûteuse.

Un autre aspect important est la sécurité. Il est impossible de se brancher clandestinement sur un réseau en fibres optiques. Chaque coupure ou modification de la fibre (ajout d'un coupleur en T par exemple) peut être immédiatement localisée en analysant le spectre de réflexion après avoir injecté de la lumière dans la fibre en question. Pour ces raisons, le Pentagone a déjà installé un grand réseau local en fibres optiques et nombre de gouvernements, d'organisations militaires et d'entreprises sont à mettre en place des systèmes similaires.

Il y a longtemps qu'on utilise des installations en fibres optiques dans l'industrie, surtout dans des milieux agressifs tels que: haute température, humidité, présence de matériaux chimiques corrosifs ou explosifs, champs électriques élevés. Le verre, matériau de construction des fibres optiques, peut facilement supporter ces conditions hostiles tout en diminuant le risque de court-circuits, toujours possible dans les installations en cuivre. De plus, le poids et les dimensions des lignes en fibres optiques sont nettement inférieurs à ceux de leurs analogues en cuivre. Ce facteur devient déterminant dans les installations internes des avions et des navires.

Finalement, des progrès technologiques ont permis aux systèmes optiques d'atteindre une bande passante de 565 Mb/s. On a même atteint récemment, en laboratoire, une vitesse de transmission de 4 Gb/s. Ces succès se traduisent par des réductions considérables du coût de transmission par bit d'information. Déjà, on peut dire que le coût de transmission à courte distance par fibres optiques est inférieur à n'importe quel moyen de transmission, radio numérique et satellites inclus.

Avant longtemps, nous disposerons de fibres optiques à la maison, pourvu que les composantes passives telles que les connecteurs, les coupleurs et les multiplexeurs-démultiplexeurs deviennent moins chères. Les progrès réalisés dans ce domaine sont manifestes et permettront bientôt un accès pratique à un éventail de nouveaux services tels que la vidéo numérique sur demande, le télé-achat et la télévision à haute définition.

Tout cela nous laisse supposer que les techniciens qui obtiendront leurs diplômes avec options en électricité, en électronique ou en électromécanique, et quelle que soit leur spécialisation précise, vont inévitablement rencontrer dans leur vie professionnelle des problèmes reliés au fonctionnement et à la maintenance des systèmes optiques.

Le Guide pédagogique pour le «Laboratoire d'optoélectronique» renferme quelques notions indispensables aux élèves et aux maîtres pour l'acquisition d'une certaine compétence en la matière. La bibliographie proposée à la fin de l'ouvrage leur permettra en outre d'enrichir leurs connaissances en fonction de leurs besoins.

Le Guide est accompagné d'un ensemble des manipulations-démonstrations, chacune décrite de manière détaillée dans son cahier d'exercices. Ces manipulations sont conçues pour permettre aux élèves d'acquérir de l'expérience dans la manipulation, l'évaluation et l'application des fibres optiques, des sources et des détecteurs optiques appropriés ainsi que des systèmes optoélectroniques de transmission des données.

Chapitre II

VOCABULAIRE RELATIF À L'OPTOÉLECTRONIQUE

(Nota: les termes anglais équivalents sont entre parenthèses)

ANGLE D'ACCEPTANCE (Acceptance Angle)
La moitié de l'angle du cône d'ouverture. Tout rayon incident intérieur au cône d'ouverture est guidé après injection dans la fibre.

$$\theta = \text{arc sin} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

ANGLE D'INJECTION (Launch Angle)
L'angle du vecteur de propagation de la lumière injectée et de l'axe optique de la fibre.

ATTÉNUATION (Attenuation)
L'atténuation $A(\lambda)$ est le rapport de la décroissance (de l'affaiblissement) de la puissance optique sur l'unité de longueur d'un guide d'ondes.

$$A(\lambda) = -10 \log \frac{P_2(\lambda)}{P_1(\lambda)} \qquad \text{en dB}$$

où P_1 = puissance optique initiale
P_2 = puissance optique à l'autre bout de la fibre $(P_2 < P_1)$

AXE OPTIQUE (Optical axis)
Axe de symétrie d'un dispositif optique.

BANDE PASSANTE (Bandwidth)

Capacité d'un guide d'ondes à transmettre une bande de fréquence spécifique (exprimée en MHz · km).

CÂBLE (Cable)

Fibre (ou ensemble de fibres) gainée(s) d'une couche protectrice, servant à transporter l'énergie lumineuse.

CENTRE DU COEUR (Core center)

Centre de la plus petite circonférence théorique entourant la section du coeur.

COEFFICIENT D'ATTÉNUATION (Attenuation coefficient)

Défini pour un guide d'ondes homogène et pour une distribution modale équilibrée:

$$\alpha(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} \qquad \text{en dB/km}$$

où $A(\lambda)$ = atténuation

L = distance

COEUR OPTIQUE (Core)

Partie centrale de la fibre optique dans laquelle la majeure partie de l'énergie lumineuse transportée est confinée. L'indice de réfraction du coeur est supérieur à celui de la gaine optique.

CÔNE D'ACCEPTANCE (Acceptance Cone)

Cône défini par le double de l'angle d'acceptance.

CONNECTEUR (Connector)

Dispositif, généralement démontable, permettant le raccordement de fibres otiques.

CONSTANTE DE PLANCK (Planck's constant)
Quantité élémentaire d'action

$$h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$$

COUPLAGE (Cross-talk)
Signaux indésirables dans une fibre, provoqués par une fibre voisine.

COUPLEUR (Coupler)
Dispositif utilisé pour connecter plusieurs fibres optiques.

COUPLEUR (EN) ÉTOILE (Star Coupler)
Dispositif dans lequel l'énergie lumineuse émise par une station pénètre dans la fibre mélangeuse et, après réflexions multiples, se répartit entre les différentes fibres de réception.

COUPLEUR EN T (T-Coupler)
Dispositif à l'aide duquel les fibres additionnelles sont connectées à une ligne principale, permettant ainsi l'échange uni- ou bidirectionel de l'énergie lumineuse.

COURANT D'OBSCURITÉ (Dark current)
Courant généré par un photodétecteur en l'absence de lumière.

COURANT DE SEUIL (Threshold Current)
Courant nécessaire pour commencer le rayonnement cohérent d'un laser à semiconducteur.

DÉCIBEL (Decibel) dB
L'atténuation de la puissance optique est exprimée en dB (voir Atténuation).

DIAMÈTRE DU COEUR (Core diameter)
Diamètre de la partie centrale de la fibre optique assurant le guidage de la lumière.

DIAMÈTRE DU FAISCEAU (Beam diameter)
Distance entre deux points situés sur la section d'un faisceau où l'intensité constitue une partie spécifique d'intensité maximale (valeurs typiques: 1/2, 1/e, $1/e^2$ ou 1/10 de I_{max}).

DISPERSION (Dispersion)
Élargissement d'une impulsion pendant sa propagation dans un guide d'ondes optiques. On distingue la dispersion chromatique (matériau) et la dispersion intermodale (du guide d'ondes).

DISPERSION INTERMODALE (Multimode Dispersion)
Élargissement d'une impulsion optique provoqué par la présence de plusieurs modes de propagation.

DISPERSION DU MATÉRIAU (Material Dispersion)
Dépendance de l'indice de réfraction de la longueur d'onde de la lumière guidée par ce milieu.

DISTRIBUTION EN BOUCLE (Ring Bus Transmission)
Système composé de plusieurs stations connectées à une ligne principale qui forme une boucle.

DISTRIBUTION EN ÉTOILE (Star Bus Transmission)
Système organisé autour d'un coupleur ou répartiteur en étoile. Ce dernier reçoit le signal émis par une des stations et le renvoie à toutes les autres stations du système.

DISTRIBUTION EN SÉRIE (Serial Bus Transmission)
La transmission se fait dans le sens station i vers station i+k (la structure la plus proche des bus électriques).

DOPANT (Dopant)
Impureté, par exemple fluor, germanium ou bore, incorporée en quantité minime à la silice pure au cours de la fabrication d'une fibre optique pour en faire varier l'indice de réfraction.

DUPLEX (Duplex)
Utilisation d'une seule ligne de transmission pour l'émission et la réception.

EFFICACITÉ DU COUPLAGE (Coupling Efficiency)
Relation des puissances optiques devant et derrière le coupleur.

EFFICACITÉ D'INJECTION (Launch Efficiency)
Efficacité du couplage d'un transmetteur avec un guide d'ondes; c'est le rapport de l'énergie radiante à l'entrée de la fibre optique sur l'énergie à la sortie du transmetteur.

EFFICACITÉ QUANTIQUE (Quantum Efficiency)
Dans un photodétecteur, rapport du nombre de paires électron-trou sur le nombre total de photons incidents. Elle caractérise le rendement global de conversion de la puissance lumineuse en courant électrique.

ÉLARGISSEMENT D'IMPULSION (Pulse Spreading)
Tendance qu'ont les impulsions de la lumière injectées dans une fibre optique à s'élargir en train de propagation.

ÉLECTROLUMINESCENCE (Electroluminescence)
Conversion directe de la puissance électrique en lumière.

ÉMETTEUR (Emitter)
Dispositif optoélectronique utilisé comme composant générateur de la lumière.

ÉMETTEUR À DIODE ÉLECTROLUMINESCENTE; ÉMETTEUR DEL (Light Emitting Diode)
Émetteur optique à semiconducteur possédant une jonction p-n qui émet une lumière non cohérente lorsqu'elle est excitée par un courant électrique.

ÉMETTEUR À DIODE LASER; ÉMETTEUR DL (Injection Laser Diode)
Émetteur optique à semi-conducteur possédant une jonction p-n de très faible dimension où se produit l'émission stimulée d'un rayonnement lumineux cohérent sous l'influence d'un fort courant électrique.

ÉPISSURES FIXES (Splicing)
Jonction permanente de deux fibres optiques effectuée par une méthode de fusion.

FAISCEAU GAUSSIEN (Gaussian Beam)
Faisceau dont la distribution radiale de l'intensité est donnée par une fonction gaussienne.

FIBRE (Fiber)
Guide d'ondes optiques.

FIBRE À GRADIENT D'INDICE (Graded Index Fiber)
Fibre dont l'indice de réfraction varie dans le coeur.

FIBRE À SAUT D'INDICE (Step Index Fiber)
Fibre à indice de coeur constant.

FIBRE AMORCE; QUEUE DE COCHON (Pigtail)
Courte fibre optique fixée en permanence à un module d'émission ou de réception optique, qui sert au couplage du module et de la fibre de ligne.

FIBRE MONOMODE (Singlemode Fiber)
Fibre dans laquelle un seul mode de lumière peut se propager. Les dimensions du coeur sont très faibles dans ce type de fibre: typiquement, son diamètre est inférieur à 5 µm.

FIBRE MULTIMODE (Multimode Fiber)
Fibre dans laquelle peut se propager plus d'un mode.

FRÉQUENCE NORMALISÉE (Normalized frequency)

Terme utilisé pour calculer le nombre de modes qui peuvent se propager dans la fibre.

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

où λ = longeur d'onde
a = rayon du coeur
n_1 = indice de réfraction du coeur
n_2 = indice de réfraction de la gaine

GAINE OPTIQUE (Cladding)

Partie de la fibre entourant le coeur optique et dont l'indice de réfraction est inférieur à celui du coeur.

GUIDE D'ONDES OPTIQUES (Optical Wave Guide)

Une fibre optique est constituée d'un milieu diélectrique intérieur (en verre, silice...) dans lequel sera confinée la plus grande partie de l'énergie lumineuse véhiculée dans la fibre et que l'on appelle le coeur. Celui-ci est entouré d'un second milieu, d'indice de réfraction plus faible, appelé la gaine. Le guide d'ondes optiques sert à transporter des signaux en utilisant les ondes électromagnétiques dans l'intervalle des fréquences optiques.

INFRAROUGE (Infrared)

Intervalle des longueurs d'ondes situé au-dessus de 750 nm et constituant la lumière non visible. Pour la transmission des signaux optiques, on préfère 3 intervalles de longueur d'onde:

800 – 1000 nm
1200 – 1300 nm
1500 – 1600 nm

LARGEUR DE RAIE (Line width)
Largeur spectrale de la lumière émise.

LASER (Laser)
Source de lumière cohérente qui émet une énergie optique sur une très faible bande passante (environ 2nm).

LASER MULTIMODE (Multimode Laser)
Laser qui émet un spectre de longueurs d'ondes.

LASER À SEMICONDUCTEUR (Solid-State Laser)
Laser dont région active est faite de matériaux semiconducteurs.

LOI DE RÉFRACTION; LOI DE SNELL (Law of refraction; Snell's Law)
Équation servant à calculer la déviation d'un faisceau lumineux lors d'un changement de milieu de propagation:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

où n_1 et n_2 = indices de réfraction des milieux 1 et 2
c_1 et c_2 = vitesses de la lumière dans les milieux 1 et 2

MACROCOURBURES (Macrobending)
Déviations axiales macroscopiques de la fibre par rapport à une ligne droite.

MICROCOURBURES (Microbending)
Déviations axiales microscopiques de la fibre par rapport à une ligne droite, provoquées par tensions mécaniques.

MODES (Modes)
Solutions permises d'une expression mathématique qui décrit la propagation de la lumière dans une fibre optique.

MULTIPLEXAGE EN LONGUEURS D'ONDES

Puissances optiques émises sur des longueurs d'ondes séparées et superposées par l'intermédiaire d'un multiplexeur optique sur la même fibre. À la réception, un démultiplexeur (ou filtre) en longueurs d'ondes effectue les opérations inverses et restitue les signaux composites.

OUVERTURE NUMÉRIQUE (Numerical Aperture NA)

Quantité servant à caractériser l'angle d'acceptance d'une fibre optique:

$$NA = n \sin \theta$$

où NA = ouverture numérique
n = indice de réfraction
θ = angle d'acceptance

PERTES DE COURBURE (Bending Loss)

Atténuation additionnelle provoquée par:

1) microcourbures
2) macrocourbures

PERTES DE FRESNEL (Fresnel Refraction Loss)

Pertes provoquées par la réflexion aux interfaces entre des matériaux ayant des indices de réfraction différents.

PERTES DE RACCORDEMENT

Affaiblissement intrinsèque causé par les jonctions entre les diverses composantes optoélectroniques (par exemple: fibre-fibre, fibre-émetteur DL, fibre-détecteur PIN, etc.).

PERTES PAR ABSORPTION (Absorption Losses)

Pertes de puissance optique provoquées par la diffusion et l'absorption par les impuretés (dans l'infrarouge), ainsi que par les transitions des électrons vers des niveaux énergétiques plus élevés (dans l'ultraviolet, $\lambda < 0{,}4\ \mu m$).

PERTES PAR DIFFUSION (Scattering Losses)
Conversion des modes guidés en modes attenués, intrinsèque du matériau et due à des fluctuations d'indice, à des fluctuations de densité ou à la présence de microdéfauts.

PHOTODIODE À AVALANCHE (Avalanche Photodiode APD)
Diode à semiconducteur dont la sensibilité est accrue par un processus de multiplication interne par avalanche lorsqu'il est soumis à une forte tension inverse. Ainsi, les électrons et les trous créés directement par l'absorption des photons acquièrent suffisamment d'énergie pour créer à leur tour d'autres paires électrons-trous.

PHOTODÉTECTEUR PIN (PIN Diode Detector)
Photodétecteur (Diode) à semiconducteur constitué d'une couche très faiblement dopée, dite intrinsèque I, entre les zones P et N et qui, lorsqu'il est soumis à une tension inverse faible, recueille les électrons directement libérés par les photons absorbés.

PHOTO-EFFET INTERNE (Internal Photoeffect)
Conversion d'une énergie lumineuse transportée par des photons en courant électrique.

PHOTON (Photon)
L'énergie radiante a une structure discrète dont le photon constitue la plus petite composante élémentaire; aussi appelé quantum d'énergie.

POLARISATION (Polarization)
Direction des oscillations du vecteur électrique d'une onde électromagnétique.

POUVOIR ÉMISSIF (Emissivity)
Rapport du pouvoir radiant d'une source quelconque de lumière sur celui d'un corps noir pour la même température d'opération.

PROFIL D'INDICE (Index Profile)
Dépendance radiale de l'indice de réfraction entre le centre de la fibre et son diamètre extérieur.

RACCORD À CONTACT (Butt joint)
Coupleur à surface frontale de deux fibres.

RAYONNEMENT COHÉRENT (Coherent Radiation)
Rayonnement dans lequel les variations relatives de phase entre deux points optiques sont stables aussi bien dans le temps que dans l'espace.

RAYON MÉRIDIONAL (Meridional Ray)
Rayon qui passe par l'axe de la fibre.

REVÊTEMENT SECONDAIRE (Fibre Buffer)
Couche protectrice entourant la fibre pour la protéger contre l'endommagement physique. Revêtement qui entoure une fibre optique et qui sert à l'isoler ou à la renforcer dans un câble. Ce revêtement est généralement épais.

VITESSE DE LA LUMIÈRE (Speed of light)

$$c = 2{,}997928 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad \text{(dans le vide)}$$

Chapitre III

BREF HISTORIQUE DE LA COMMUNICATION OPTIQUE

Dès l'apparition des premières civilisations, des techniques de télécommunication optique assez primitives semblent avoir été utilisées en Chine, en Égypte et en Assyrie. Au début de notre ère, les Romains avaient expérimenté l'usage de feux sur des collines pour leurs besoins de communications militaires. Mais le premier «système» n'a été construit qu'en 1880, quand Alexander Graham Bell a inventé son «photophone». Bell a utilisé une cellule de sélénium photosensible pour détecter les variations d'intensité de la lumière.

L'étape la plus récente a été franchie en 1960 avec l'invention du LASER, qui a permis le développement rapide des communications optiques de haute capacité. Un laser constitue une source de lumière à bande étroite bien adaptée comme porteur d'information. Les systèmes non guidés de communication ont été conçus immédiatement après l'invention du laser en utilisant l'atmosphère comme médium de propagation. C'est en 1970 seulement que la première fibre optique à perte faible avec affaiblissement de 20 dB/km a été mise au point par Corning Glass Works et que les communications par fibres optiques ont commencé à être réellement utilisables.

Chapitre IV

OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE ET FIBRES OPTIQUES

1. La lumière comme onde électromagnétique

Les fibres optiques sont des fibres de verre se comportant en guides de la lumière. Pour comprendre les phénomènes de propagation et le fonctionnement des fibres, on peut employer deux approches différentes. Dans l'approche de l'optique géométrique ou théorie des rayons, on étudie l'évolution des rayons lumineux se propageant en zigzag par réflexions successives. Cette interprétation est bien sûr simplifiée, mais, comme elle est beaucoup moins abstraite que l'approche électromagnétique, elle peut très bien être utilisée à un niveau élémentaire de formation en optoélectronique.

Dans l'approche électromagnétique ou approche modale, on observe comment se propage le champ électromagnétique de façon analogue à la description classique des guides d'ondes. Cette interprétation est fondée essentiellement sur les solutions des équations de Maxwell dans une configuration caractéristique du milieu en question, c'est-à-dire des fibres optiques. Cette question sera abordée au chapitre V.

1.1 Notions de base

La lumière grâce à laquelle s'effectue notre perception du monde extérieur est une petite partie de la gamme (ou du spectre) des ondes électromagnétiques, celles-ci s'étendant des radiofréquences aux radiations à haute énergie (figure 1).

Parce qu'elles sont des combinaisons de champs électriques et magnétiques, ces ondes sont caractérisées par leur longueur d'onde et par leur fréquence d'oscillation. Elles se propagent dans le vide ou dans le milieu optique.

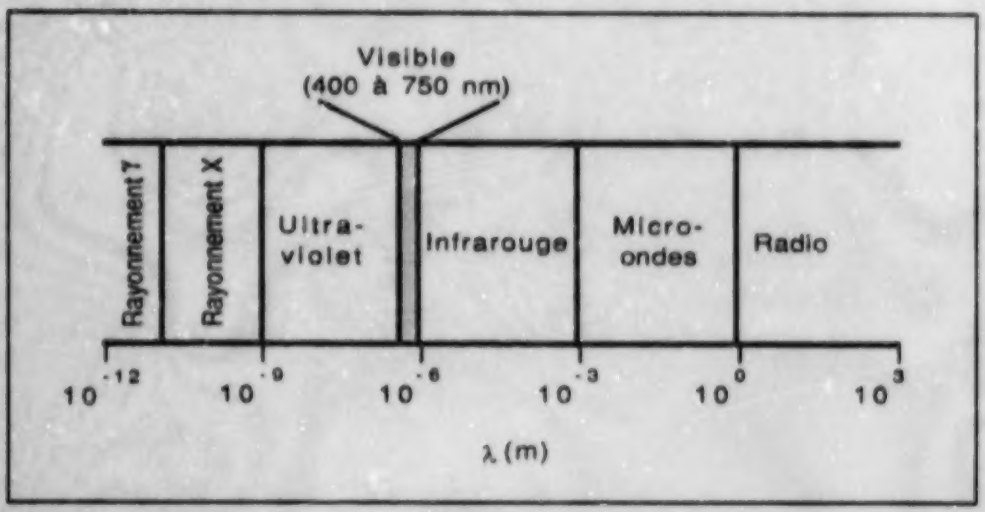


Figure 1

Spectre des ondes électromagnétiques

La gamme approximative des longueurs d'ondes de la lumière visible se situe entre 400 et 750 nm (1 nanomètre = 10^{-9} m); toutefois, la gamme la plus utile à des applications dans le domaine des transmissions optiques tombe dans l'intervalle de radiation infrarouge se situant entre 800 et 1500 nm.

Dans le vide, la lumière se propage à la vitesse approximative de 3×10^8 m/s. Dans les milieux optiques tels que l'air, l'eau ou le verre, la vitesse est réduite jusqu'à 50% dans certains cas.

2. Propagation dans les matériaux

L'interaction de la lumière et d'un milieu optique est normalement déterminée par un seul nombre, soit l'indice de réfraction du milieu. C'est le quotient de la vitesse de la lumière dans le vide par sa vitesse dans le milieu.

$$n = \frac{c}{v}$$

L'indice de réfraction est toujours supérieur à 1 car la vitesse de la lumière dans un médium quelconque ne peut être qu'inférieure à celle dans le vide. Pour l'air, par exemple, il atteint une valeur proche de 1; dans l'eau, il est de 1,33 approximativement et pour le verre, il peut varier entre 1,44 et 1,9.

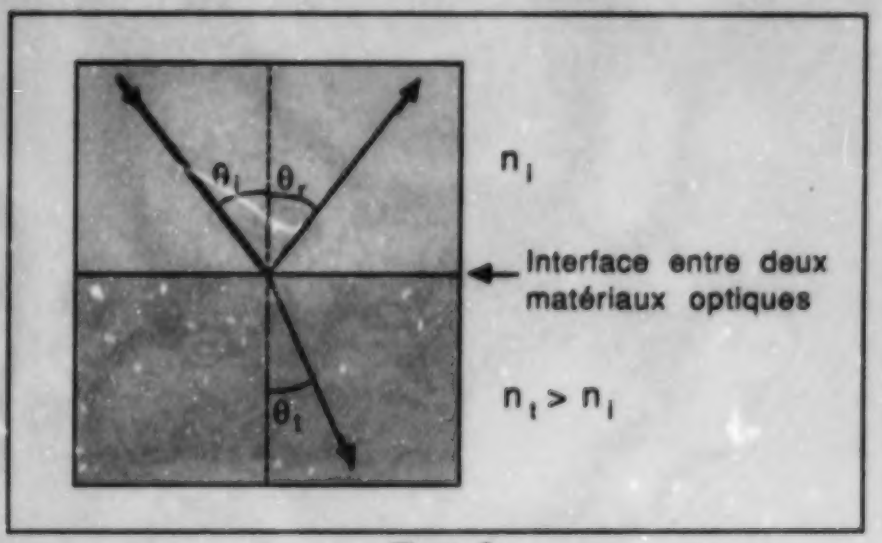


Figure 2

Géométrie de réflexion et de réfraction

θ_i = angle d'incidence
θ_r = angle réfléchi
θ_t = angle réfracté
n_i = indice de réfraction du milieu optique moins dense
n_t = indice de réfraction du milieu optique plus dense

Dans un médium homogène (c'est-à-dire ayant un indice de réfraction constant en espace), la lumière se propage en ligne droite. S'il se produit un changement rapide du milieu de propagation, la direction de la lumière obéit aux lois de l'optique géométrique. En notant l'angle d'incidence d'un rayon comme étant l'angle formé par le rayon incident et une ligne perpendiculaire à l'interface au point où la lumière le touche, on peut formuler deux lois fondamentales (figure 2):

Il faut toutefois enrichir cette image simple des observations suivantes: l'indice de réfraction dépend largement de la longueur d'onde de la lumière guidée par le milieu; ce phénomène est appelé dispersion du matériau. De plus, une partie de l'énergie lumineuse sera absorbée par le milieu pendant son passage.

2.1 Loi de réflexion

L'angle de réflexion (mesuré aussi par rapport à la droite qui est perpendiculaire à la surface au point d'incidence) est égal à l'angle d'incidence.

$$\theta_r = \theta_i$$

2.2 Loi de réfraction (Loi de Snell)

L'angle de la lumière réfractée est donnée par l'équation:

$$n_t \sin(\theta_t) = n_i \sin(\theta_i)$$

D'habitude, on caractérise le matériau à indice de réfraction supérieur (inférieur) comme étant optiquement plus dense (moins dense). Dans la

figure 3, on voit une série de rayons incidents, dans un milieu d'indice n_i, qui s'approchent d'un second milieu dont l'indice de réfraction n_t est inférieur à n_i. Selon la loi de Snell, l'angle du rayon réfracté dans cette configuration sera toujours supérieur à l'angle d'incidence.

Il peut arriver que pour un certain angle critique il n'y ait pas de rayon réfracté, toute la puissance optique se propageant parallèlement à l'interface (b) ou étant réfléchie à l'intérieur du milieu optiquement plus dense (c). Ce cas correspond à une réflexion totale interne qui se produit pour l'angle d'incidence critique:

$$n_t \sin \theta_t = n_t \sin 90^\circ = n_i \sin \theta_{cr}$$

$$\sin \theta_{cr} = \frac{n_t}{n_i}$$

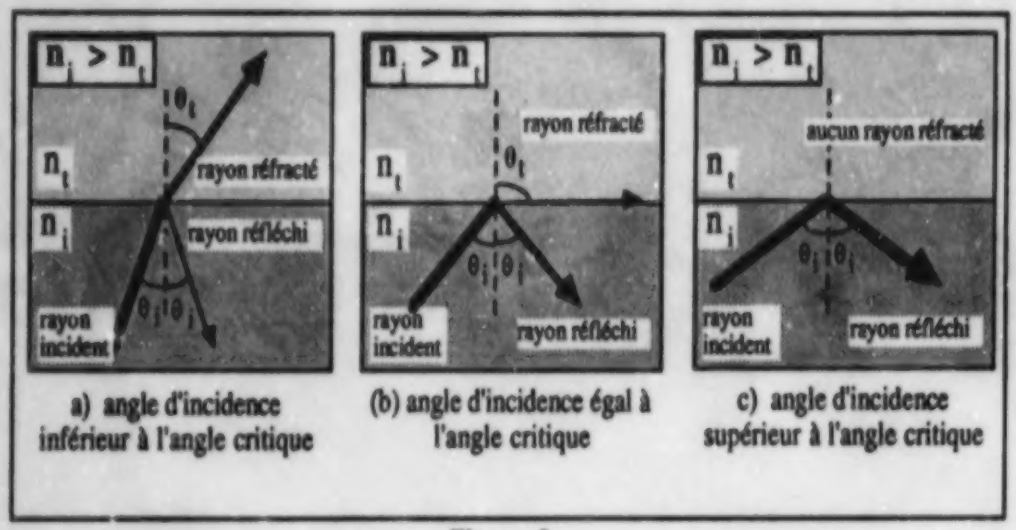


Figure 3

Série de rayons incidents

Dans l'approche géométrique, l'interface entre les deux milieux fonctionne comme un miroir idéal. Pratiquement, si l'on tient compte du

caractère ondulatoire de la lumière, une onde dite évanescente entre dans le milieu moins dense, mais son amplitude décroît rapidement en fonction de la profondeur de la pénétration.

3. Interprétation géométrique de la propagation dans les fibres optiques

Une fibre optique est constituée d'une partie centrale (en verre, silice...), appelée le coeur, entourée d'une gaine optique dont l'indice de réfraction est inférieur à celui du coeur (figure 4). Une couche externe de plastique est normalement ajoutée à la fibre pour lui assurer une plus grande protection et une meilleure résistance mécanique. La majeure partie de l'énergie lumineuse transportée à l'intérieur de ce système est confinée dans le coeur grâce à la différence des indices de réfraction, celui du coeur étant plus grand que celui de la gaine. La figure 4 montre que cette différence détermine le cône des rayons qui peuvent être acceptés par la fibre en question, la différence fractionnaire des indices étant définie comme:

$$\Delta = \frac{n_c - n_g}{n_c}$$

où n_c = indice de réfraction du cœur
n_g = indice de réfraction de la gaine

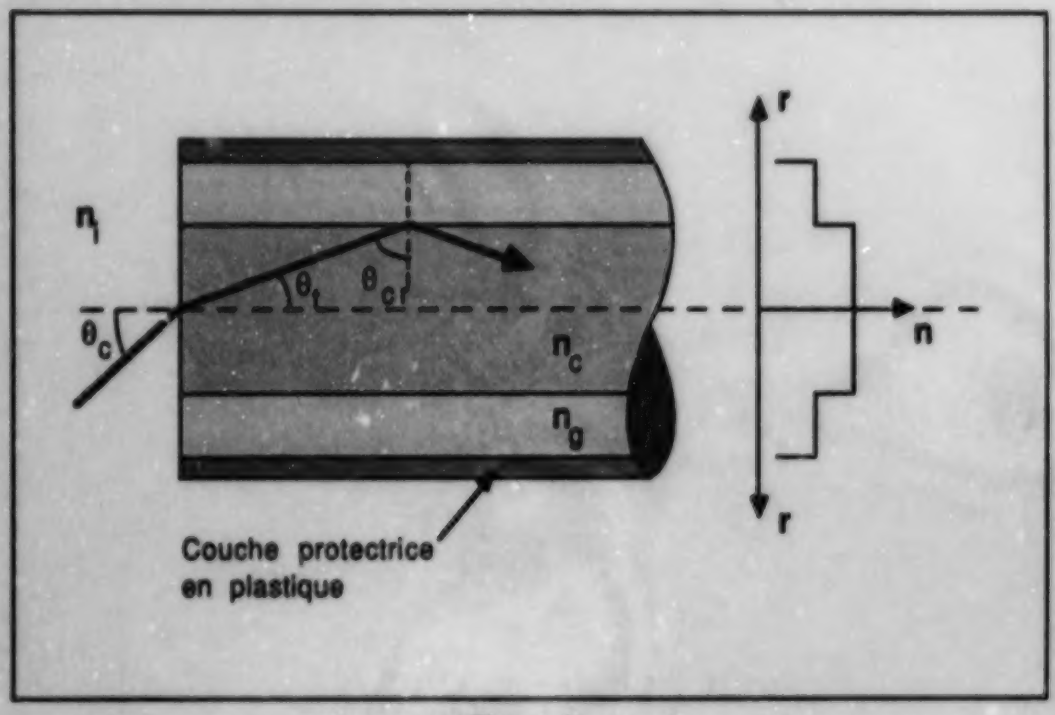


Figure 4

Rayon dans un guide d'onde à l'échelon d'indice

n_l = indice de réfraction du milieu à l'extérieur de la fibre

n_c = indice de réfraction du cœur

n_g = indice de réfraction de la gaine

Pour trouver ce cône (θ_c) à partir de la figure 4 et en utilisant les notions d'angle critique et de Δ, on peut appliquer la loi de Snell:

$$n_l \sin \theta_c = n_c \sin \theta_i = n_c \sin (90^\circ - \theta_{cr})$$

$$= n_c \cos \theta_{cr}$$

$$= n_c \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{cr}}$$

En prenant $\sin \theta_{cr} = \frac{n_g}{n_c}$, on obtient finalement:

$$n_i \sin \theta_c = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

Pour n'importe quel système optique (que ce soit une lentille, un objectif microscopique ou une fibre optique), on peut définir une ouverture numérique (NA) comme étant une mesure de la grandeur du cône d'acceptation de la lumière.

$$NA = n_i \sin \theta_{max}$$

Dans la majeure partie des cas, le rayon est injecté à partir d'un milieu initial composé d'air dont l'indice de réfraction $n_i = 1$. L'aperture (ouverture) numérique d'une fibre à saut d'indice peut alors être exprimée par la formule suivante:

$$NA = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

Quand $\Delta << 1$, cette équation peut être remplacée par l'approximation suivante:

$$NA = \sqrt{(n_c - n_g)(n_c + n_g)}$$

$$= \sqrt{(n_c \Delta)(n_c(2 - \Delta))}$$

$$= \sqrt{n_c \cdot \Delta \cdot 2n_c}$$

$$= n_c \sqrt{2\Delta}$$

Dans une fibre dont l'indice de coeur est constant en fonction d'une variable radiale r (fibre à saut d'indice), le guidage de la lumière est donc assuré par la réflexion totale. Le trajet lumineux est alors un trajet en zigzag qui suit l'inclinaison θ du rayon sur l'axe optique; la distance parcourue varie fortement. Le rayon entré dans la fibre avec un angle d'incidence nul se propagera sans réflexion, donc beaucoup plus vite qu'un rayon entré avec un angle. Pour le rayon incident sous l'angle s'approchant de l'angle critique, le temps additionnel nécessaire pour parcourir la distance L (par rapport au rayon axial) est donné par:

$$\delta t = \frac{\delta L}{v} = \frac{L\, n_c}{c}\left(\frac{n_c}{n_g} - 1\right) = \frac{L\, n_c^2\, \Delta}{n_g\, c}$$

Il devient donc évident qu'une impulsion de durée t, qui représente un bit d'information, sera effectivement élargie jusqu'à une durée $t + \delta t$, diminuant ainsi le nombre utile des impulsions par seconde qui peut être envoyé par la fibre optique.

En rendant l'indice de réfraction variable en fonction de la distance radiale r, avec le profil d'indice donné par exemple par l'équation exponentielle

$$n^2(r) = n_0^2 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha}\right]$$

où n_0 = est l'indice de réfraction au centre du coeur
α = l'exposant qui détermine la forme du profil d'indice,

Les chemins optiques des différents rayons peuvent devenir pratiquement identiques. Les fibres optiques dont l'indice de réfraction varie dans le coeur sont généralement désignées par le terme «fibre à gradient d'indice». Pour $\alpha \to \infty$, on se trouve dans le cas de la fibre à saut d'indice; quand $\alpha = 2$, le profil est parabolique.

En utilisant l'approche de la théorie des rayons, on peut comprendre qualitativement, sans mathématiques compliquées, comment le gradient d'indice existant dans le coeur peut pratiquement éliminer le phénomène parasite d'élargissement des impulsions par δt. Si on examine le profil parabolique (figure 5), on voit que les chemins optiques

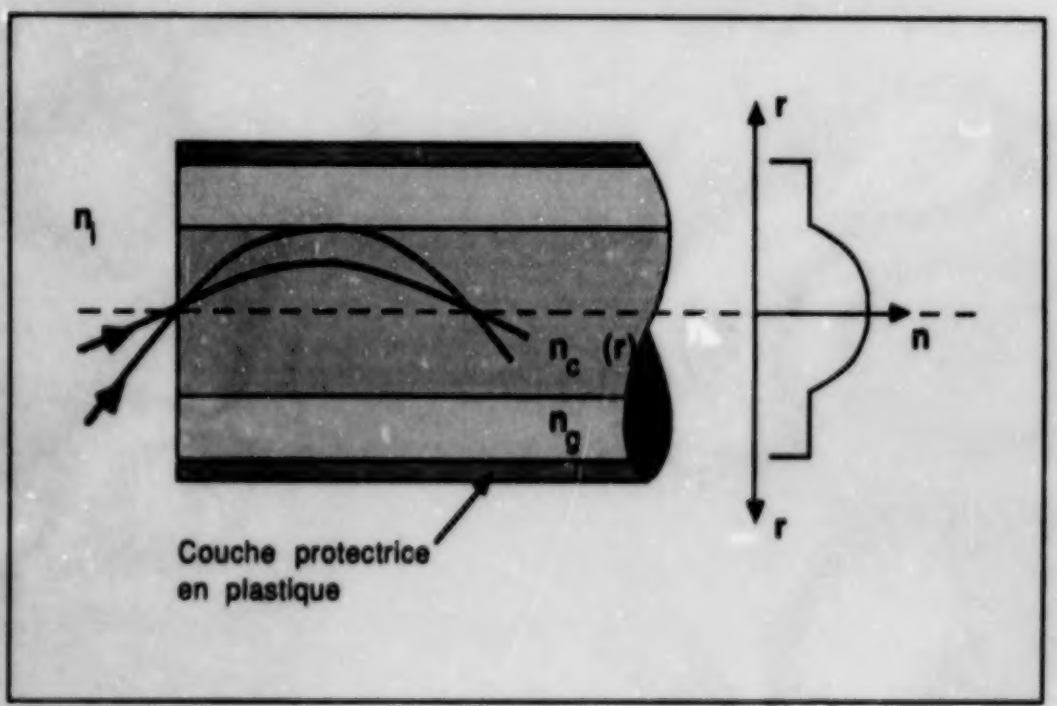


Figure 5

Rayon dans un guide d'onde à gradient d'indice

$n_c(r)$ = **indice de réfraction du coeur (fonction de la coordonnée radiale r)**

des rayons sont sinusoïdaux, au lieu d'être en zigzag comme dans le cas de la fibre à saut d'indice. Pour les rayons éloignés de l'axe optique la distance parcourue est plus grande, mais ceux-ci voyagent à une vitesse supérieure au rayon central (n est plus grand au centre du coeur). En choisissant le profil d'indice, on peut alors totalement compenser ces deux effets et obtenir $\delta t = 0$.

Chapitre V

PHÉNOMÈNES ONDULATOIRES DANS LES FIBRES OPTIQUES

1. Champs ondulatoires dans une fibre

Bien que facile à comprendre, l'approche géométrique ne donne pas d'explications satisfaisantes des effets observables dans les fibres quand le diamètre du coeur optique est comparable à la longueur d'onde de la lumière véhiculée par la fibre. Il faudra alors utiliser des équations de Maxwell et décomposer le champ en utilisant une autre représentation, les modes.

Toutes les informations concernant les constantes des matériaux, les indices de réfraction et les conditions aux limites d'une configuration cylindrique doivent être incorporées dans les équations de Maxwell. La combinaison de ces équations donne finalement l'équation d'onde qui peut être résolue pour obtenir les distributions (modes) de champs électromagnétiques qui seront capables de se propager dans la fibre.

Dans le système cylindrique des coordonnées (figure 6), ces solutions peuvent être représentées par les fonctions harmoniques en espace et en temps:

$$E(r, \emptyset, z) = f(r) \cos(\omega t - \beta z + \gamma) \cos(q\emptyset) \qquad (*)$$

où
- r = position radiale dans la fibre
- $\emptyset$ = orientation angulaire dans la fibre
- z = position longitudinale dans la fibre
- ω = fréquence de la lumière en rad/s ($\omega = 2\pi\nu$ où ν est la fréquence linéaire en Hz.)

t = temps en secondes
β = constante de propagation en rad/unité de distance
γ = phase qui détermine l'amplitude en t=0 et en z=0
q = nombre entier

Il est nécessaire de faire une distinction entre le paramètre β et le vecteur de propagation $k = 2\pi n / \lambda_0$, où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide et n est un entier. Dans l'approche géométrique, β est tout simplement la projection du vecteur de propagation sur l'axe z.

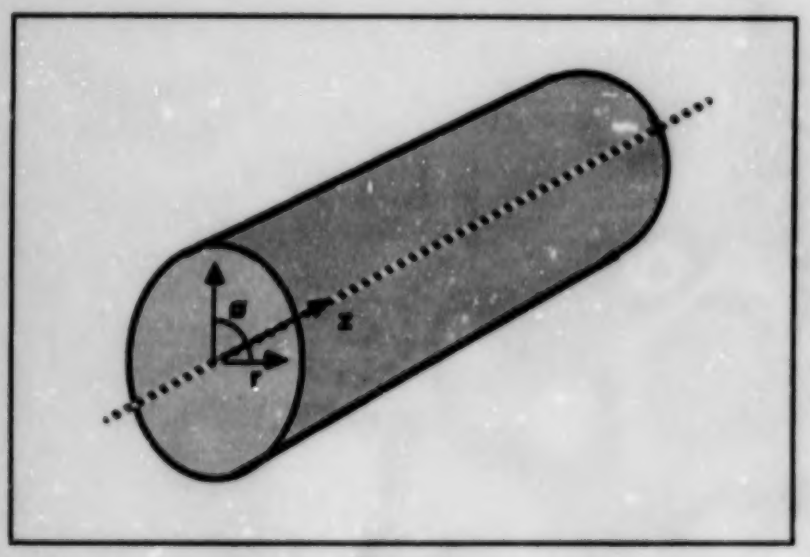


Figure 6
Système des coordonnées cylindriques

On peut obtenir les solutions pour les paramètres β, f(r) et q en substituant l'équation (*) dans l'équation d'onde. Ces solutions vont dépendre de la géométrie de la fibre particulière ainsi que du profil d'indice du coeur et de celui de la gaine optique. Pour une fibre à saut d'indice, les solutions exactes sous forme de fonctions de Bessel peuvent être facilement obtenues, tandis que pour les fibres à gradient d'indice, les solutions sont très compliquées et approximatives seulement.

N.B. Une façon simple de visualiser une fonction de Bessel est de frapper légèrement sur le côté d'une tasse de café: les ondes circulaires générées sur la surface du liquide sont précisément des fonctions de Bessel.

Pour déterminer facilement quels modes seront supportés par une fibre donnée, il est utile de se servir d'un paramètre V, appelé fréquence normalisée:

$$V = k_f \; a \; NA = \frac{2\pi \; a}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

où k_f = nombre d'onde dans le vide.

Le graphique 7 présente des constantes de propagation pour différents modes en fonction du paramètre V:

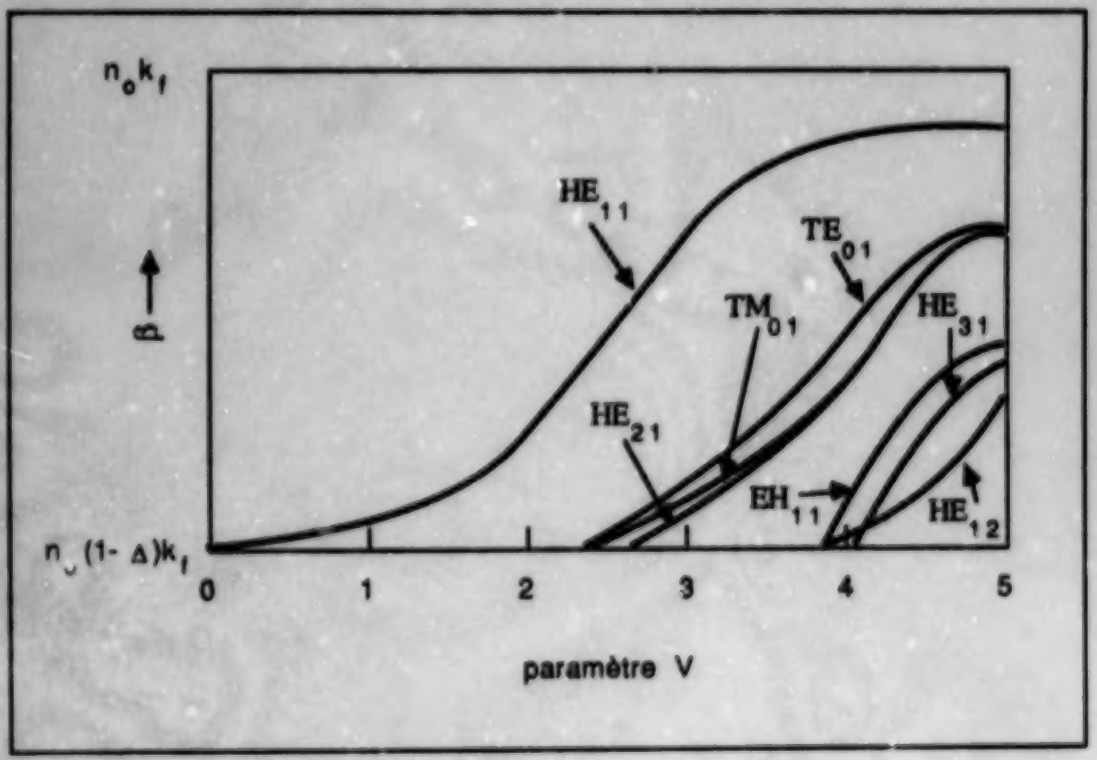


Figure 7
Modes de propagation dans une fibre optique

Pour une fibre donnée, V prend une certaine valeur concrète permettant de déterminer facilement les modes supportés par la fibre en question, ce qu'on peut faire en traçant une ligne verticale au point V et en calculant les intersections avec les courbes modales. Il est évident que, dans les fibres pour lesquelles V < 2,405, un seul mode pourra être supporté. On peut ainsi déterminer une longueur d'onde de coupure pour une fibre donnée, en admettant $a \cdot NA = const.$, et en calculant une longueur d'onde de l'équation:

$$k_f \cdot a \cdot NA = 2{,}405$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_{cr}} \, a \, NA = 2{,}405$$

$$\lambda_{cr} = \frac{2\pi \cdot a \cdot NA}{2{,}405}$$

Une fibre dans laquelle seul le mode HE_{11} peut se propager est considérée comme une fibre monomode. Analysons par exemple la fibre dont le diamètre du coeur a = 4 µm et NA = 0,11. Pour la longueur d'onde 633 µm on obtient V = 2,19, bien à l'intérieur de la région monomode.

2. Modes de propagation

Les fibres multimodes utilisées en télécommunication peuvent avoir les paramètres: a = 25µm et NA = 0,20 ou a = 50µm et NA = 0,30, ce qui, pour la longueur d'onde 633 µm, produit les paramètres V = 50 ou 150, respectivement. Les fibres en question vont alors supporter un grand nombre de modes avec une certaine distribution de la lumière entre les modes particuliers; le tout dépendant fortement des conditions d'injection de la lumière à l'entrée de la fibre optique.

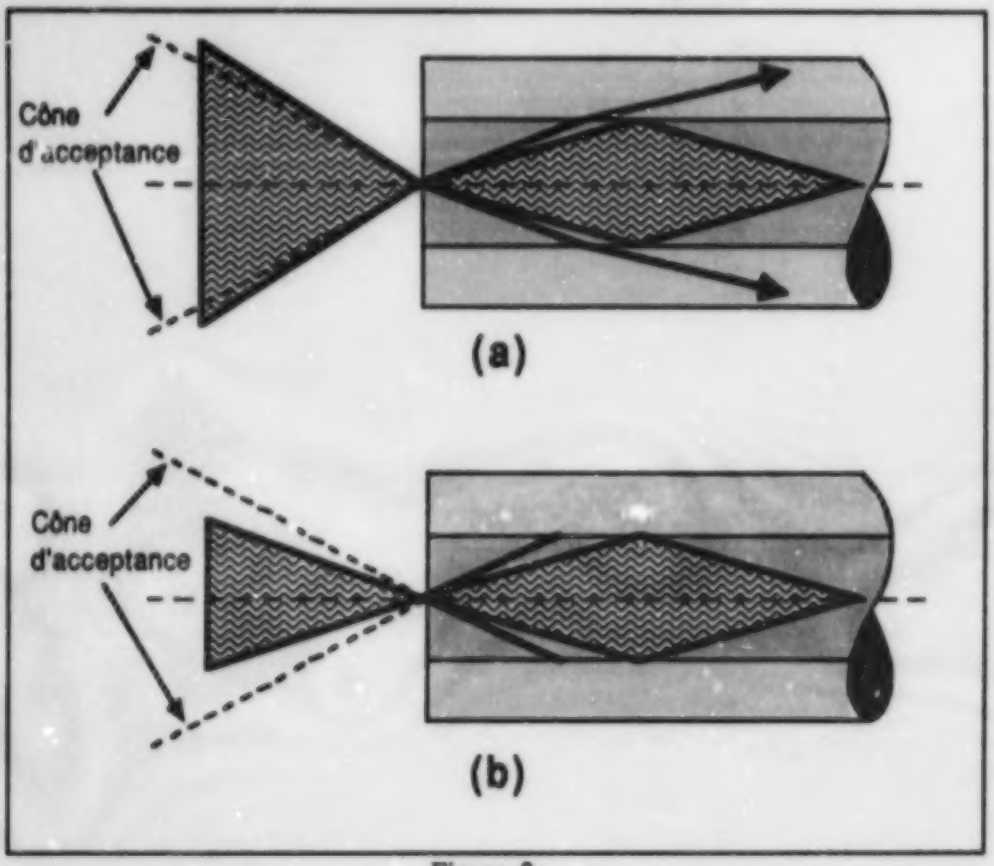


Figure 8

Conditions d'injection de la lumière dans une fibre multimode

(a) : fibre sursaturée

(b) : fibre insaturée

Quand la NA du faisceau injecté est plus grande que la NA de la fibre, certaines parties de la lumière ne peuvent pas se propager et la fibre est considérée comme sursaturée. Réciproquement, quand la NA de la lumière est plus petite que l'ouverture numérique de la fibre, seuls les modes d'ordre inférieur seront véhiculés (dans une image géométrique ce sont les rayons injectés sous un angle très petit). Dans ce cas, la fibre est dite insaturée (voir figure 8).

Ces deux répartitions provoquent les diverses conditions d'atténuation de la puissance optique; cette atténuation est plus grande dans le cas d'une fibre sursaturée, car les modes d'ordre supérieur verront une partie plus grande de leur champ électromagnétique réfracté à l'intérieur de la gaine. De plus, en présence de micro- et macrocourbures, certaines parties de la puissance optique seront émises sous forme de radiation sortant à l'extérieur de la fibre (modes de radiation), tout en augmentant l'atténuation optique. En outre, certains modes, dits modes de fuite, vont pénétrer à l'intérieur de la gaine par un effet de tunnel. Il est alors évident que la distribution modale sera au début très instable et qu'elle s'homogénéisera uniquement après que la lumière aura été véhiculée sur une distance de quelques kilomètres par exemple. Une fois cette distance parcourue, la distribution de l'énergie optique entre les modes guidés sera essentiellement stable.

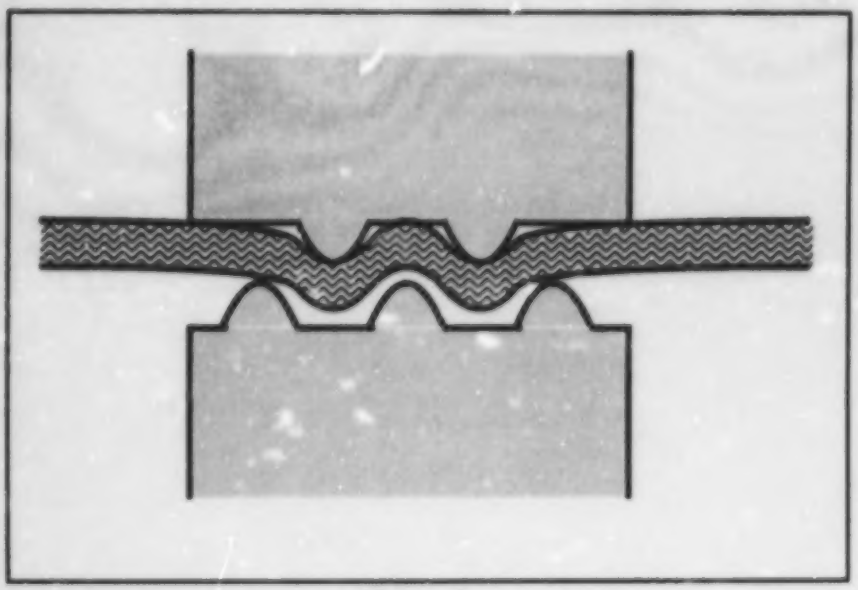


Figure 9

Brouilleur de modes pour les fibres optiques

Pour les besoins métrologiques, il est souvent très important de stabiliser au plus vite la structure modale, ce qui se fait en utilisant un brouilleur de modes, tel que montré à

la figure 9. Le dispositif peut produire les courbures contrôlées de la fibre en provoquant le couplage à l'extérieur des modes de radiation, des modes de fuite et de certaines parties des modes d'ordre supérieur. Finalement, la lumière qui reste à l'intérieur de la fibre sera distribuée de manière stable entre les modes de propagation.

3. Polarisation des ondes

Pour comprendre les phénomènes liés à la polarisation des ondes électromagnétiques, il faut se rendre compte que le champ électromagnétique est une grandeur vectorielle variable dans le temps et dans l'espace. Ses deux composantes, le champ électrique et le champ magnétique, sont dans la plupart des cas perpendiculaires l'une à l'autre ainsi que par rapport à la direction de la propagation. Si le vecteur de propagation et sa composante «z» sont connus, il ne nous faut que les données concernant le champ électrique pour obtenir l'information complète sur la distribution du champ dans le médium de propagation. Finalement, c'est la direction du champ électrique qui détermine la polarisation d'une onde électromagnétique.

Pour les différentes sources de rayonnement, la polarisation peut être omnidirectionnelle ou, comme dans le cas des lasers, le vecteur du champ électrique peut conserver sa direction dans l'espace, ce qui correspond à la polarisation linéaire (figure 10).

La décomposition du vecteur E obtenue par projection sur les axes x et y donne deux composantes E_x et E_y. S'il y a entre ces composantes un décalage dans le temps, il se traduit par un déphasage entre deux ondes E_x et E_y, et diverses formes de polarisation peuvent apparaître telles que la polarisaton elliptique ou la polarisation circulaire (cette dernière polarisation se produit si le déphasage est égal à $\pi/2$, comme l'illustre la figure 10).

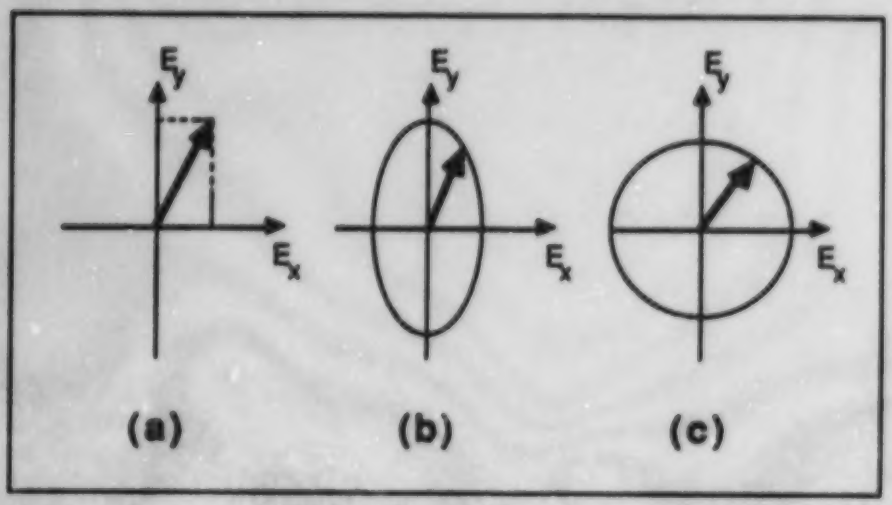


Figure 10

Différents types de polarisation de la lumière

(a) polarisation linéaire: l'orientation du champ électrique est fixe

(b) polarisation elliptique: l'orientation et la grandeur de E varient

(c) polarisation circulaire: E tournant mais de grandeur constante

4. Interférence

On a associé la lumière à une onde. Que se passe-t-il lorsque deux ondes se rencontrent? Elles s'additionneront, ou se soustairont, selon leur phase relative. Voici une explication graphique de ce phénomène. La figure ci-dessous représente deux ondes en phase qui s'additionnent pour donner une onde résultante d'amplitude égale à la somme des amplitudes des deux ondes incidentes:

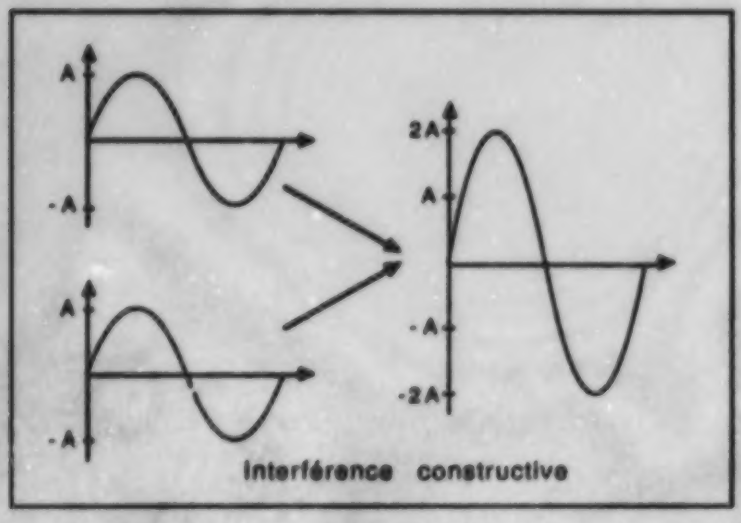


Figure 11

Interférence constructive: ondes en phase

Si les ondes sont déphasées d'un demi-cycle (180°) elles se soustrairont:

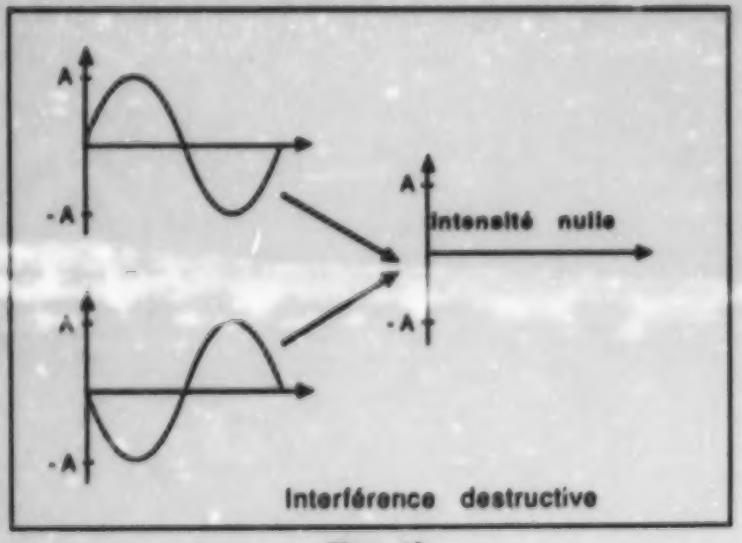


Figure 12

Interférence destructive: ondes en opposition de phase

Le principe de l'interférence est extrêmement utile dans le développement de capteurs basés sur les fibres optiques. Supposons qu'on dispose d'un système composé de 2 fibres optiques dans lesquelles on injecte la lumière d'un laser He-Ne dont la longueur d'onde est de 6328Å (0,6328 μm). À l'autre extrémité des fibres, on fait interférer la lumière des deux fibres. Si l'une des deux fibres est étirée de 0,63 μm, ce qui est moins qu'un millième de millimètre, on pourra observer le passage d'une frange d'interférence; c'est-à-dire que l'intensité deviendra nulle, puis reviendra à sa valeur initiale On peut ainsi mesurer très précisément la valeur d'une force qui contraint une fibre à s'étirer. Ce principe est utilisé pour la mesure de:

champs magnétiques: en bobinant la fibre sur un mandrin composé d'un matériau qui se contracte sous l'effet d'un champ magnétique;

accélérations: en attachant une masse à des fibres optiques. L'inertie de la masse provoquera alors une force qui étirera certaines fibres;

pression: en bobinant la fibre sur un mandrin dont le diamètre sera affecté par la pression;

température: l'élongation d'une fibre dépend fortement de la température.

5. Cohérence

Dans la section précédente, on a mentionné qu'on utilisait la lumière d'un laser. Pourquoi n'utilise-t-on pas plutôt une DEL ou encore une ampoule ordinaire? Car pour être en mesure d'observer les franges d'interférence, on doit disposer d'une source de lumière cohérente.

La lumière est composée de photons. Un photon est une particule d'énergie se propageant sous la forme d'une oscillation d'un champ électrique et magnétique. On représente le photon comme étant un paquet d'ondes tel que montré dans la figure ci-dessous:

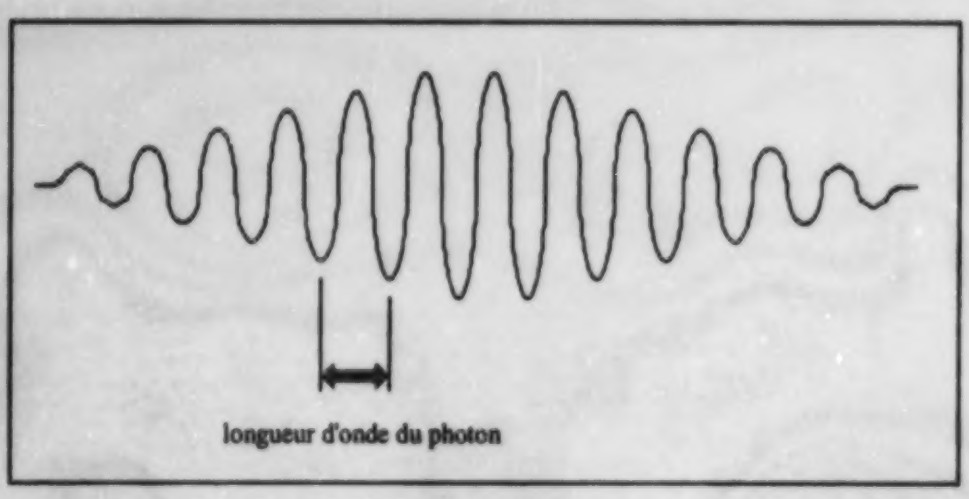


Figure 13

Représentation graphique d'un photon

Une lumière est dite cohérente lorsque les photons qui la composent ont tous la même phase. La figure 14 explique graphiquement la différence entre les sources de lumière cohérente et incohérente.

Dans le cas d'une diode laser, les photons constituent un train d'ondes continues. Si on divise le faisceau en deux pour ensuite ramener ensemble les deux parties, la différence de phase entre les deux faisceaux demeurera constante et on observera une figure d'interférence. Par contre, on ne pourra pas observer une figure d'interférence à partir de la lumière émise par une DEL. Certains photons interféreront en se soustrayant, d'autres en s'additionnant, mais le processus est aléatoire et on n'observera aucune figure.

Les sources de lumière sont généralement incohérentes, et ce, parce que les photons composant le rayonnement qu'elles produisent sont émis spontanément, et donc se propagent indépendamment les uns des autres. Des exemples de sources de lumière incohérente sont les ampoules incandescentes, les tubes fluorescents, les diodes DEL et les lampes à arc.

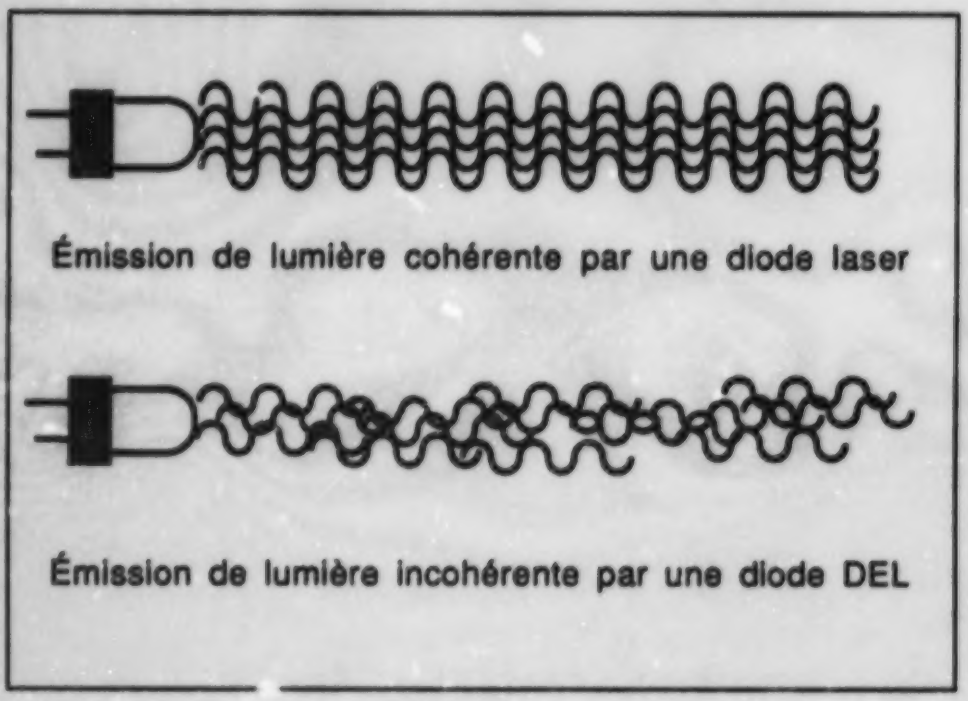


Figure 14

Sources de lumière cohérente et incohérente

Pour qu'une source de lumière soit cohérente, il faut que les photons soient émis de façon stimulée. C'est le cas pour le laser. D'ailleurs, le mot «*laser* » est un acronyme anglais pour **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (Amplification de lumière par émission stimulée de radiation). On parle d'émission stimulée parce que l'émission d'un photon à l'intérieur du laser se produit lorsqu'un photon passe à proximité d'un atome prêt à émettre. À cause de l'influence de ce photon qui passe, le photon émis aura la même phase. Finalement, tous les photons qui seront émis auront la même phase.

Chapitre VI

PROPAGATION DES SIGNAUX ET PROPRIÉTÉS DES FIBRES OPTIQUES

1. Généralités

Afin de développer des fibres optiques pour les besoins des systèmes de télécommunication, il faut d'abord prendre connaissance des quatre grands objectifs importants à atteindre. Ceux-ci sont prédéterminés par les fonctions assurées par les fibres qui fonctionnent comme composants de tels systèmes. Un exemple assez simple de module de communication par fibres optiques est illustré à la figure 15. Le système est constitué par une source optique modulée par impulsions. Le signal à

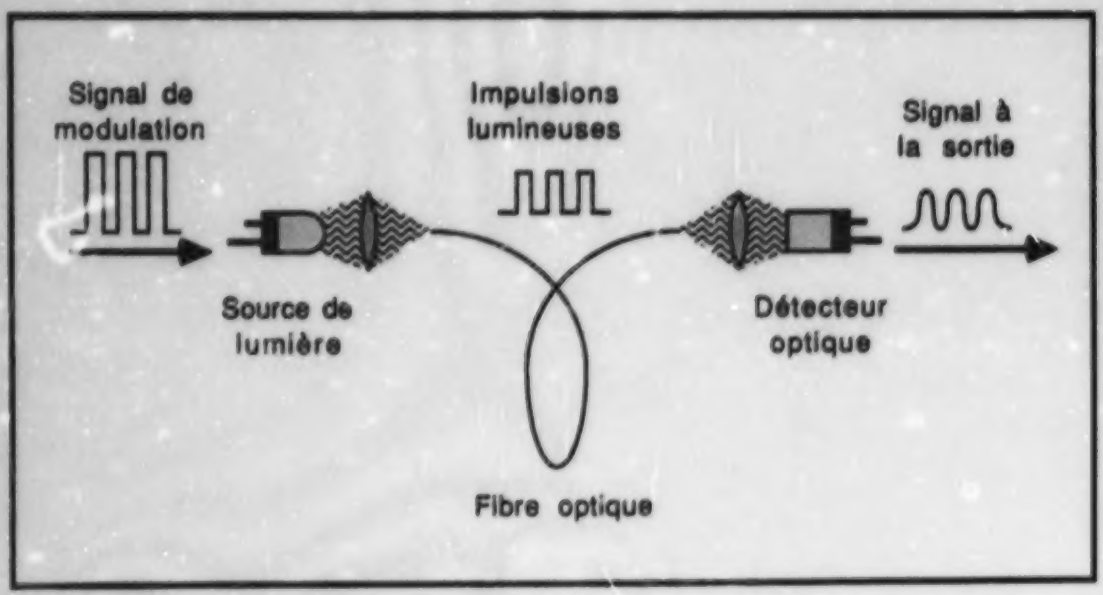


Figure 15
Système de communication par fibres optiques

l'entrée, qui contient l'information à envoyer, est «imprimé»sur le rayon au moment où il sort de la source. On fait ensuite converger le faisceau à l'aide de lentilles et il est injecté à l'intérieur de la fibre où il est véhiculé vers le détecteur. Là, les processus de détection et de démodulation permettent de reconstruire le signal d'origine et de décoder l'information dont il est porteur.

Le premier objectif est donc de maximiser la quantité de lumière injectée dans la fibre, ce qui peut se traduire par une exigence de maximisation d'ouverture numérique (NA).

Le deuxième objectif vise à réduire au minimum les pertes de lumière occasionnées par transfert de l'énergie lumineuse véhiculée de l'entrée vers la sortie d'une fibre optique. Ces pertes sont caractérisées par l'atténuation se produisant par unité de longueur du guide d'ondes (en dB/km), ce qui est une mesure adéquate de la décroissance de la puissance optique.

Le troisième objectif concerne la maximisation de la capacité de transfert d'information d'une fibre optique. Il y a au moins deux facteurs limitant cette capacité: l'atténuation de l'amplitude du signal en fonction de la distance parcourue et l'élargissement des impulsions. Ce dernier phénomène, dit de dispersion, est provoqué par une tendance des impulsions de lumière injectée à s'élargir pendant la propagation, ce qui peut rendre illisible l'information imprimée sur le rayon à cause du chevauchement des impulsions voisines.

Finalement, il est nécessaire que les fibres puissent résister aux tensions mécaniques et qu'elles préservent cette propriété pendant toute leur période d'utilisation.

Les notions d'ouverture numérique et de modes de propagation ayant déjà été expliquées, nous allons maintenant nous concentrer sur le problème des pertes et de la dispersion.

2. Pertes

Supposons qu'une impulsion d'une amplitude I_0 est injectée à gauche dans le coeur optique, comme l'illustre la figure 16. En général, l'intensité I de la lumière décroîtra exponentiellement au fur et à mesure que la distance parcourue (z) augmentera:

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$$

où α = coefficient d'atténuation

I_0 = intensité initiale à l'entrée où z = 0.

L'atténuation en dB/km s'exprime pour z = 1 km comme étant:

$$dB/km = -10 \log_{10} \frac{I(z)}{I_0}$$

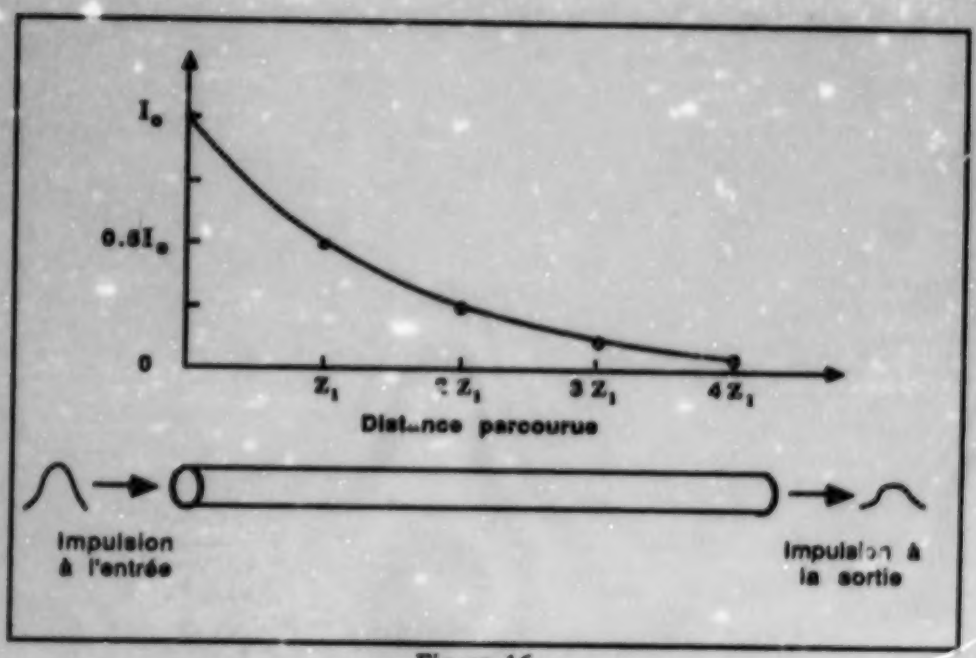


Figure 16

Atténuation d'intensité de la lumière en fonction de la distance z dans une fibre optique

Si, par exemple, après avoir parcouru une distance particulière z_1, l'intensité décroît jusqu'à 0,5 I_0, après une distance $2z_1$, elle décroîtra donc jusqu'à 0.25 I_0. En général, chaque augmentation incrémentale z_1 d'intensité la réduira d'une demie de l'intensité au début de l'incrément. L'intensité sortant au point $z = 5\ z_1$ sera de $2^{-5} = 1/32^e$ de la valeur initiale, et ainsi de suite.

L'atténuation est normalement exprimée en dB/km. Par exemple si une fibre a une atténuation de 10 dB/km, l'intensité de la lumière véhiculée par cette fibre décroîtra jusqu'à $1/10^e$ de sa valeur initiale après avoir parcouru la distance de 1 km. L'atténuation de 3 db/km correspond à une réduction approximative de 50% de l'intensité injectée après 1 km.

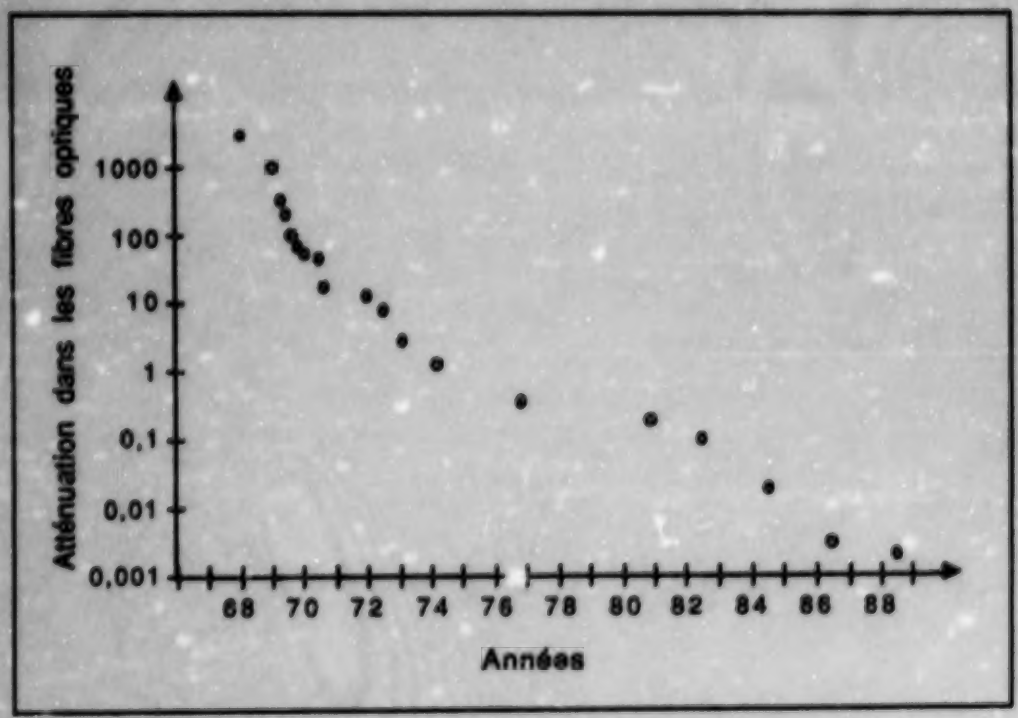


Figure 17

Progrès dans la diminution de l'atténuation des signaux optiques dans les fibres

La figure 17 illustre les progrès accomplis au cours des deux dernières décennies dans les recherches portant sur la diminution de l'atténuation des signaux optiques par les fibres. Il est devenu évident qu'une fois que la barrière de 1 dB/km a été franchie, les applications des télécommunications optiques sont devenues réalisables. Les grands fournisseurs offrent présentement des fibres typiques avec des atténuations de 0,35 et de 0,21 dB/km, pour des longueurs d'onde de 1,3 μm et de 1,55 μm, respectivement.

Pour concevoir un simple système de transmission par fibres optiques ou pour améliorer leurs conditions d'utilisation, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de leur fonctionnement, y compris l'origine des atténuations et les autres phénomènes parasites, comme la distorsion du signal par exemple.

Il y a au moins trois facteurs jouant un rôle important dans le phénomène de l'atténuation. Premièrement, le matériau lui-même est absorbant, c'est-à-dire que l'énergie lumineuse peut être transformée en énergie des électrons et/ou en énergie des vibrations des ions OH^-. Deuxièmement, les diverses perturbations provoquent, de façon plus ou moins brutale, des échanges d'énergie entre les modes guidés et non-guidés (c'est le phénomène de couplage de modes), ce qui entraîne des pertes en augmentant l'énergie des modes rayonnant et des modes à fuite. Ce type de pertes s'appelle «pertes par diffusion»ou «diffusion Rayleigh». Les irrégularités qui les causent sont: la fluctuation de densité du matériau, les variations locales d'indice de réfraction, la présence de micro-défauts et les microcourbures. Enfin, une atténuation additionnelle peut être provoquée par les pertes de courbure imputables au montage ou aux courbures accidentelles d'une fibre optique.

Le coefficient d'atténuation totale α [en dB/km] varie de manière très caractéristique en fonction de la longueur d'onde (figure 18). La dépendance des pertes par diffusion Rayleigh (1ère partie) est fonction de λ^{-4}. Le maximum vers λ = 1,4 μm (2e partie) est causé par les ions hydroxyles (OH^-), tandis que la 3e partie est due aux micro- et macrocourbures ainsi qu'à la présence d'un plus grand nombre de modes de fuite.

L'influence des micro- et macrocourbures est schématisée dans la figure 19 (a et b).

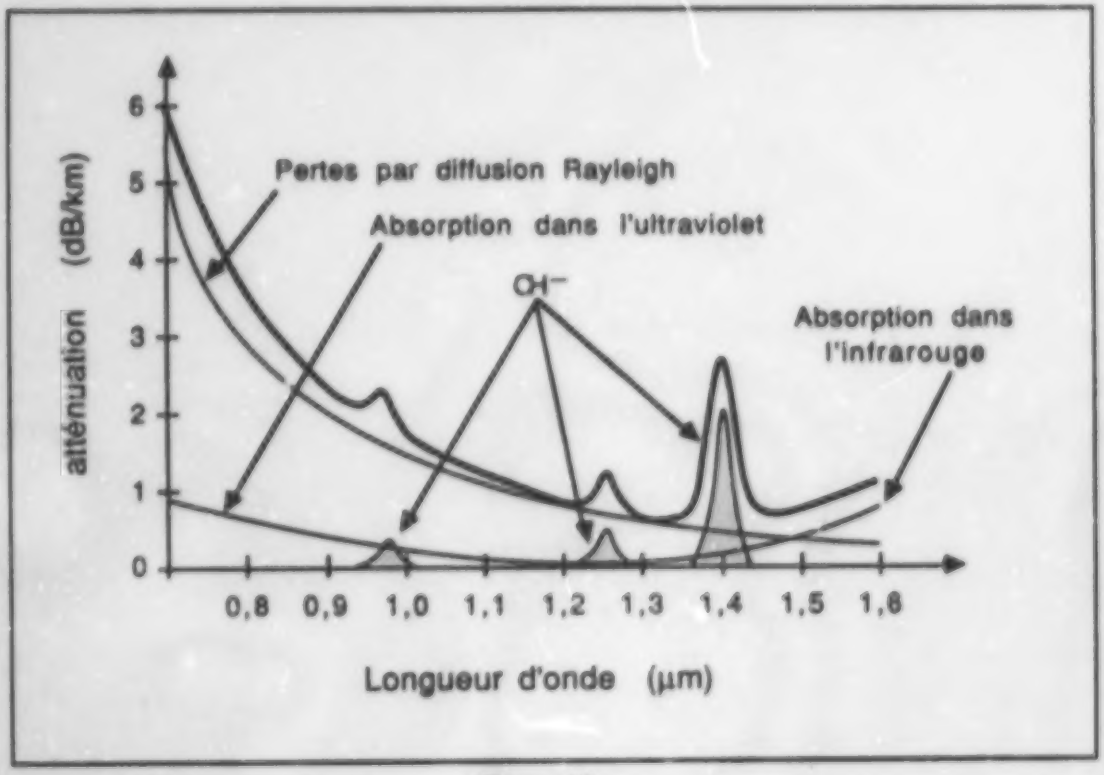


Figure 18

Exemple de perte dans une fibre optique en fonction de la longueur d'onde

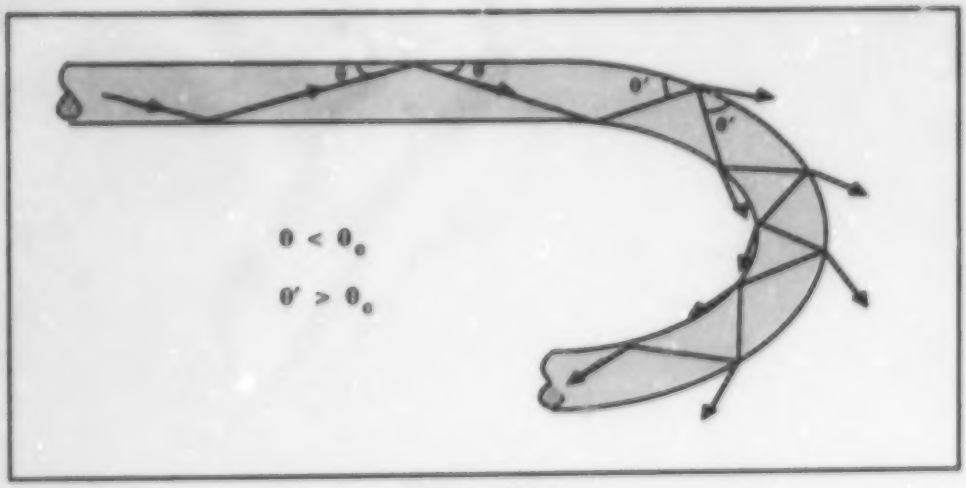


Figure 19 (a)

Génération des modes à fuite causée par des macrocourbures

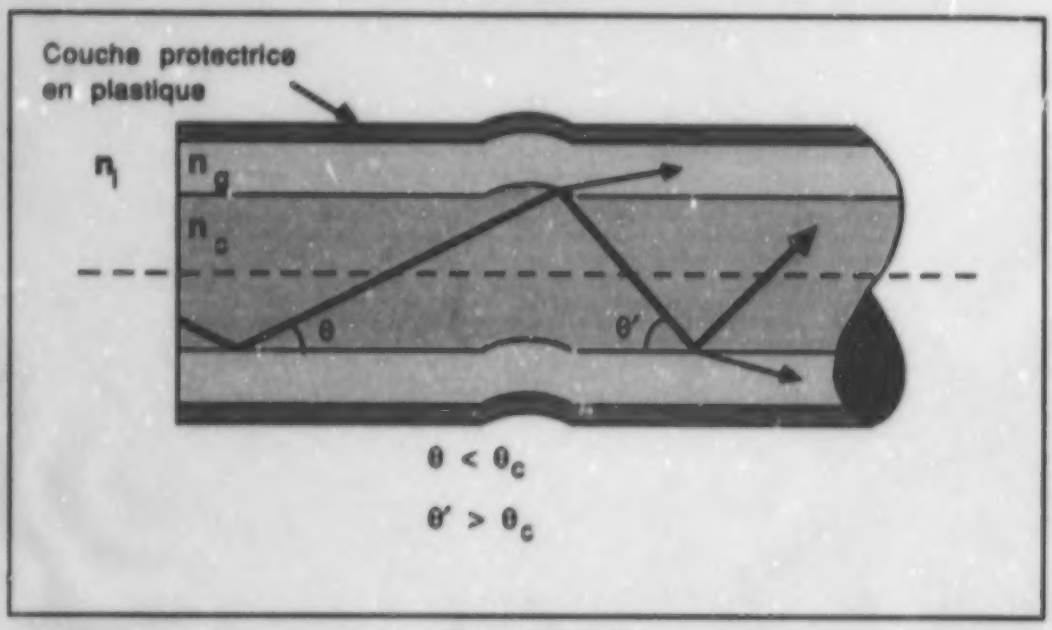


Figure 19 (b)

Génération des modes à fuite causée par des microcourbures

3. Dispersion

On a déjà constaté que, pour s'assurer de la préservation de l'information «imprimée»sur le faisceau lumineux, il faut que les impulsions individuelles de lumière maintiennent leur forme (surtout leur largeur) en se propageant à l'intérieur d'une fibre optique.

Quand la lumière est injectée à l'intérieur de la fibre multimode à saut d'indice, son énergie est répartie entre plusieurs modes. Chacun de ces modes est véhiculé à une vitesse différente, il parcourt un chemin différent et, finalement, il arrive à la sortie de la fibre à un moment différent, ce qui constitue effectivement une source majeure d'élargissement de l'impulsion qu'on appelle dispersion intermodale. Cet effet parasite est fortement réduit dans les fibres à gradient d'indice, dans lesquelles les durées de propagation pour chacun des modes sont presque identiques, même si leurs parcours et leurs vitesses sont différents.

Il est alors évident que les fibres à gradient d'indice ont des qualités supérieures sur le plan de la distorsion des impulsions véhiculées. Cependant, la propagation n'est pas idéale à cause de la dispersion du matériau (ou dispersion chromatique). Celle-ci s'explique par le fait que la vitesse de la lumière dans le matériau diélectrique dépend de la longueur d'onde. Si la source optique émet un rayonnement autre qu'à une seule longueur d'onde (en pratique, même pour des lasers on observe une certaine largeur de raie émise), les longueurs d'onde différentes vont se propager à des vitesses différentes, ce qui finalement provoquera un élargissement des impulsions.

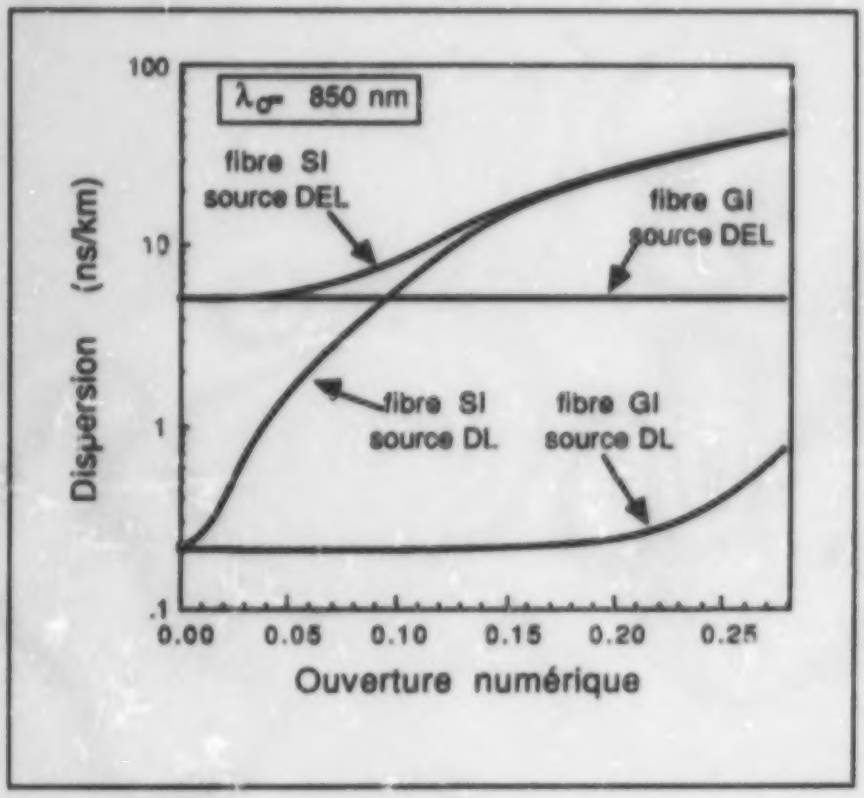


Figure 20

Variations de la dispersion (en nanosecondes par kilomètre) en fonction de l'ouverture numérique pour les fibres à saut d'indice (SI) et à gradient d'indice (GI) lorsque la lumière est injectée d'un laser ou d'une diode électroluminescente

La figure 20 illustre la dépendance théorique de la dispersion intermodale et de celle du matériau en fonction de l'ouverture numérique NA dans diverses conditions d'opération. La dispersion est exprimée en élargissement d'impulsion (en nanosecondes) pour chaque kilomètre de transfert dans la fibre (ns/km). On considère cependant qu'il y a deux types de sources de lumière avec la longueur d'onde nominale de 850 nm: un laser à largeur de raie de 2 nm = 2×10^{-9} m et une diode électroluminescente à largeur de raie de 20 à 70 nm.

On voit facilement d'après la figure que dans chaque situation la dispersion est plus grande pour la diode DEL. De plus, l'augmentation de l'ouverture numérique provoque l'accroissement de la dispersion: NA, qui est plus grande, correspond au plus grand paramètre V et le nombre de modes qui peuvent se propager s'accroît donc aussi avec l'augmentation de la dispersion intermodale.

C'est la bande passante d'un guide optique qui caractérise la capacité de ce guide à transmettre des signaux en présence de la dispersion. Les valeurs actuellement atteignables se présentent comme suit:

1) Comportement limité par la dispersion intermodale:

fibres à saut d'indice:	30 MHz · km
fibres à gradient d'indice:	
laboratoire	1000 MHz · km
production	400 MHz · km

2) Comportement limité par la dispersion du matériau:
(fibres à gradient d'indice, 0,85µm)

DEL (largeur de raie 35 nm)	150 MHz · km
LD (largeur de raie 2 nm)	2500 MHz · km

4. Procédés de fabrication des fibres optiques

La fabrication des fibres optiques pose un certain nombre de problèmes. Il faut d'abord obtenir des matériaux suffisamment purs pour que leur atténuation soit minimale. Les dimensions faibles et leur régularité, la précision exigée pour obtenir le profil d'indice désiré, la protection et la résistance mécanique des fibres présentent également toutes des difficultés importantes à surmonter.

En marge des méthodes classiques, on a vu se développer des techniques parfois relativement complexes de fabrication, plus proches de celles utilisées dans la

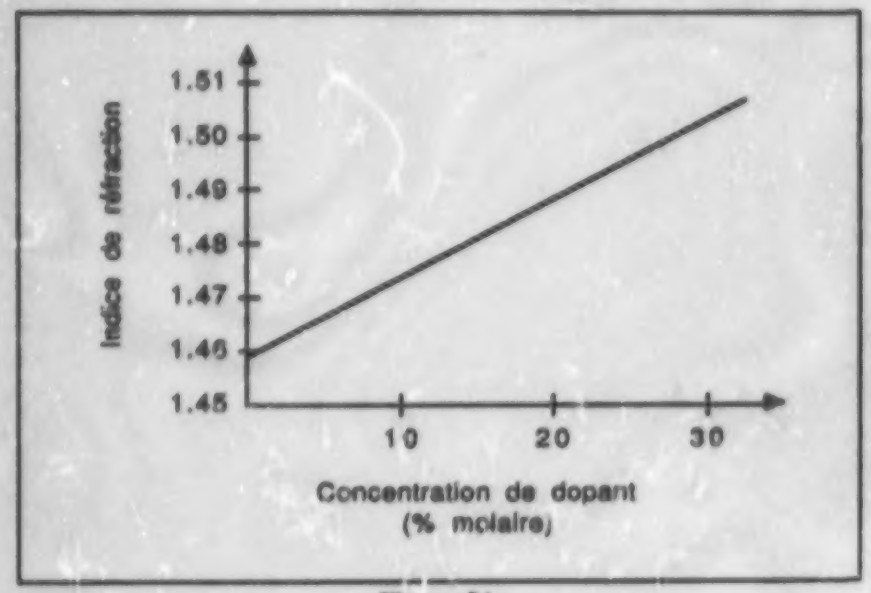


Figure 21

Indice de réfraction d'un verre de silice en fonction de la concentration de GeO_2 (en pourcentage molaire)

fabrication des semiconducteurs. Nous allons donc passer en revue ces méthodes qui permettent d'obtenir des fibres à concentrations de dopants particulières et aux profils d'indice souhaités dans le coeur et dans la gaine optique. On obtient normalement ces profils en ajoutant différents types de verre ou de dopants aux formateurs de base

SiO_2 et B_2O_3. Comme modificateurs on utilise entre autres GeO_2, Na_2O, CaO et P_2O_5. La figure 21 illustre l'effet de la concentration croissante de GeO_2, ajoutée à la silice SiO_2, sur l'indice de réfraction du matériau qui en résulte. L'ouverture numérique NA augmente aussi avec l'indice, ce qui entraîne également l'augmentation de l'atténuation: finalement cela nous force à faire un compromis entre la NA et l'atténuation.

4.1 La méthode du double creuset

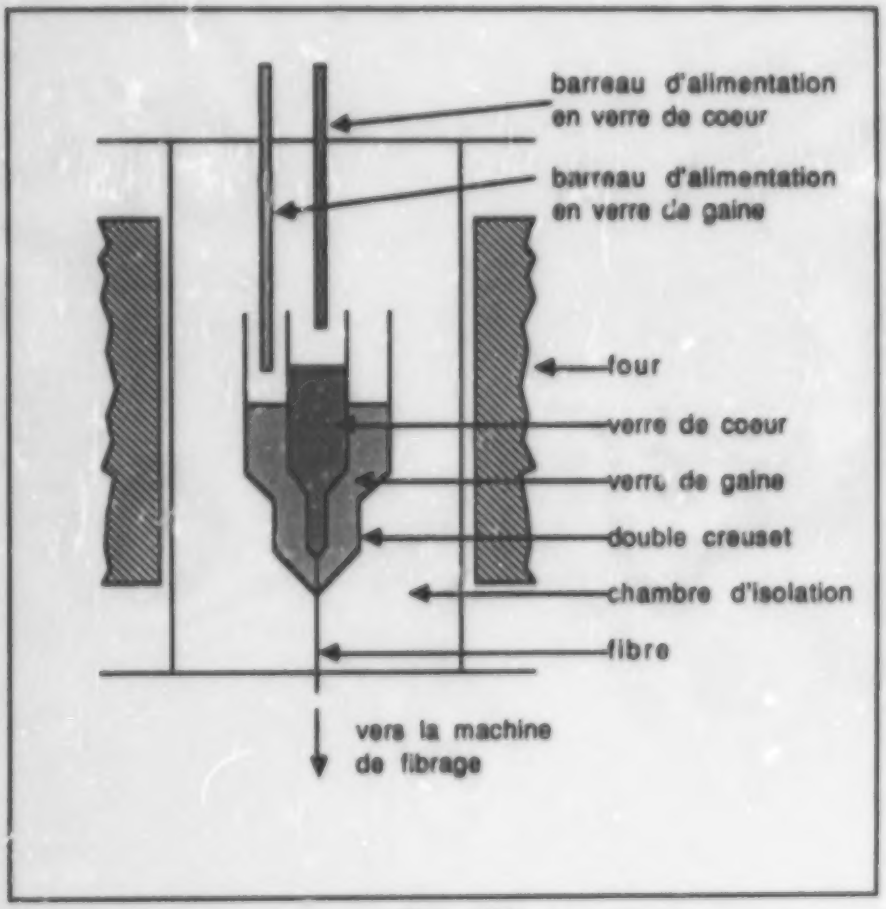


Figure 22

Fabrication des fibres optiques avec la méthode du double creuset

Illustrée par la figure 22, la méthode du double creuset est la plus classique et la plus directe. Elle consiste à faire fondre les matières premières de départ (SiO_2, P_2O_3, Na_2O, CaO, etc), à les affiner et à les fibrer en tirant sur le matériau en fusion. Le verre du coeur est placé dans un creuset intérieur (1), normalement fait de platine, tandis que le verre de la gaine est placé dans un creuset extérieur (2) de forme cylindrique. Une fois à l'état visqueux, les deux verres sont mis en contact dans la section de refroidissement située au-dessous du four: la fibre qui en résulte est ensuite retirée à l'extérieur sous tension contrôlée. Entre le four et le tambour de réception permettant d'enrouler la fibre au fur et à mesure de sa fabrication, on place d'habitude un système de mesure du diamètre et un système d'enrobage de la fibre pour la protéger mécaniquement.

4.2 L'oxydation en phase vapeur

Le procédé d'oxydation en phase vapeur peut être utilisé selon différentes configurations, intérieures, extérieures ou axiales. La production de particules de verre SiO_2 se fait au moyen de réactions chimiques telles que:

$$SiCl_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2Cl_2$$

Ensuite, l'indice du matériau peut être facilement modifié en ajoutant, à la phase gazeuse, des dopants en concentrations contrôlées. La figure 23 illustre le procédé intérieur d'oxydation en phase gazeuse (Inside Vapor-Phase Oxydation IVPO).

Un mélange de vapeurs de chlorures, de $SiCl_4$ et d'oxygène est hydrolysé par la flamme à l'intérieur d'un tube-substrat et forme un précipité de particules de verre très fines (suie) sur la surface du tube qui est mis en rotation.

La couche déposée est ensuite vitrifiée pour former une pellicule de verre de silice dopé. Le substrat extérieur est alors enlevé et le tube est étiré en fibre après élimination du trou intérieur.

Des procédés plus sophistiqués qui emploient des principes identiques sont le procédé extérieur (OVPO: Outside Vapor Phase Oxidation) et le procédé axial (VAD: Vapor Axial Deposition).

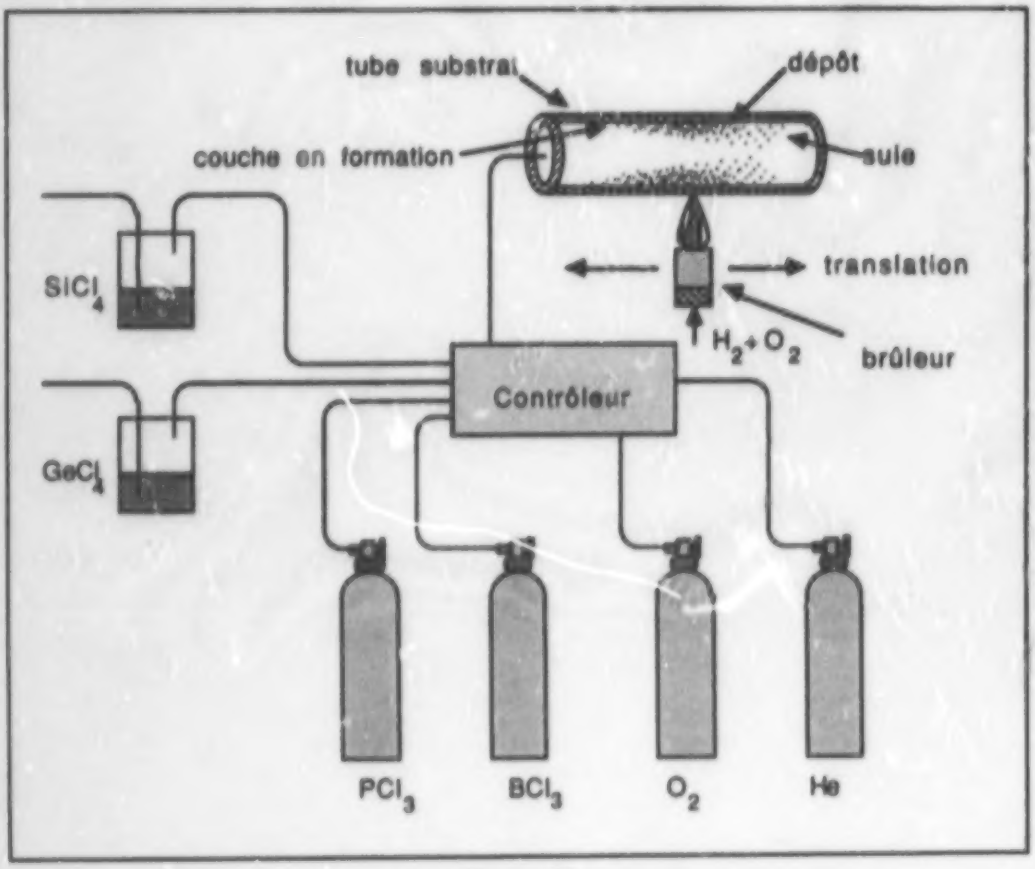


Figure 23

Procédé intérieur d'oxydation en phase gazeuse (IVPO)

Chapitre VII
CABLES ET CONNECTEURS

Les fibres produites à l'étape du fibrage sont assez fragiles: les microfractures présentes sur la surface extérieure peuvent facilement casser la fibre. De même la poussière, l'humidité ou l'abrasion provoquées par les conditions extérieures dégradent leurs capacités de transmission. Immédiatement après la fabrication, les fibres sont donc revêtues d'une couche de protection primaire faite en plastique. Certains types de fibres sont aussi enduits d'une couche protectrice secondaire, assez épaisse, de polyamides ou de nylon.

1. Câbles optiques

Afin d'augmenter le nombre de canaux de communication, plusieurs fibres sont montées en «faisceaux» de fibres. Cette opération est appelée multiplexage dans l'espace (Space Division Multiplexing) et produit des unités à canaux multiples, soit des câbles.

1.1 Les câbles à structure classique

Pour fabriquer des câbles à partir de fibres optiques, on peut utiliser les procédés traditionnels de la câblerie en cuivre. Toutefois, il faut laisser aux fibres individuelles une certaine flexibilité et une certaine liberté de mouvement afin de minimiser les microcourbures. La figure 24 montre une section de câble classique (a) ainsi qu'un exemple de câble commercial fabriqué par SIECOR Corp (b).

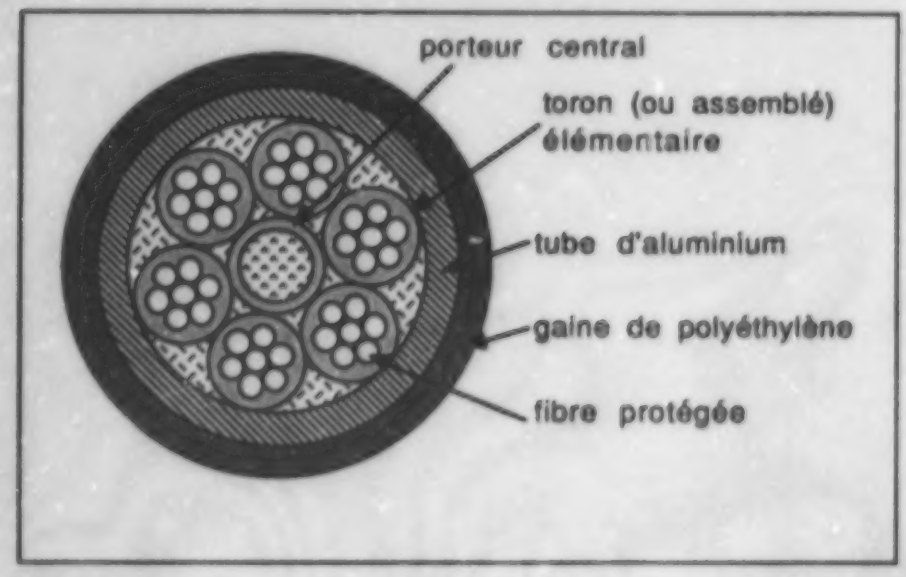


Figure 24 (a)

Câble à structure classique -- section du câble

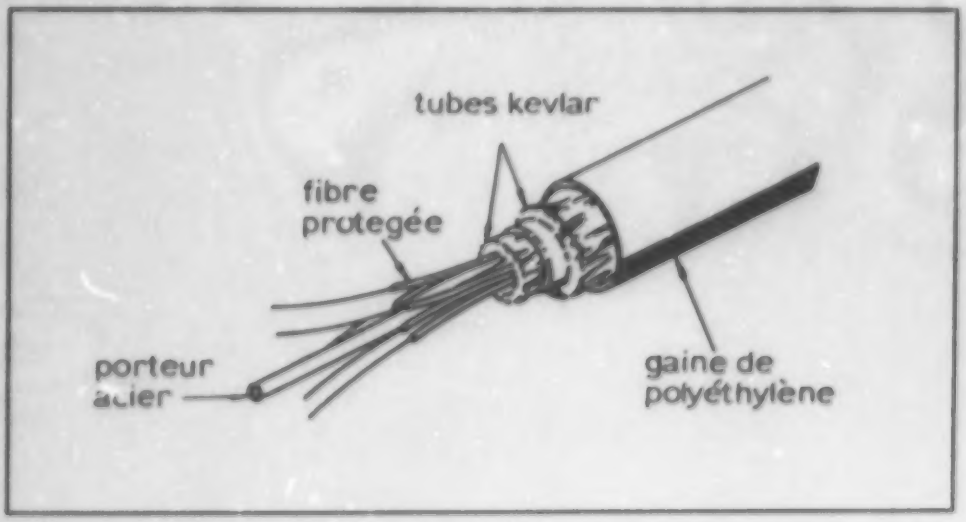


Figure 24 (b)

Câble à structure classique

Exemple de câble commercial fabriqué par SIECOR Corporation

1.2 Les câbles à structure ruban

Cette structure de câble a été mise au point aux Laboratoires Bell. La figure 25 illustre son principe (a) et présente un exemple de câble commercial (b). Un ruban est constitué de n fibres parallèles engainées par deux feuilles de matière plastique capables d'absorber certaines tensions mécaniques et qui assurent en même temps la rigidité du système. Ainsi, m rubans empilés donnent une matrice m x n qui est ensuite enroulée dans une épaisse gaine métallique. La structure ruban permet d'obtenir une grande densité (12 x 12 = 144 fibres dans l'exemple 25 b) ainsi que de réduire les coûts. Sa résistance mécanique est cependant inférieure à celle d'une structure classique et présente des problèmes de raccordement des fibres configurées en matrice.

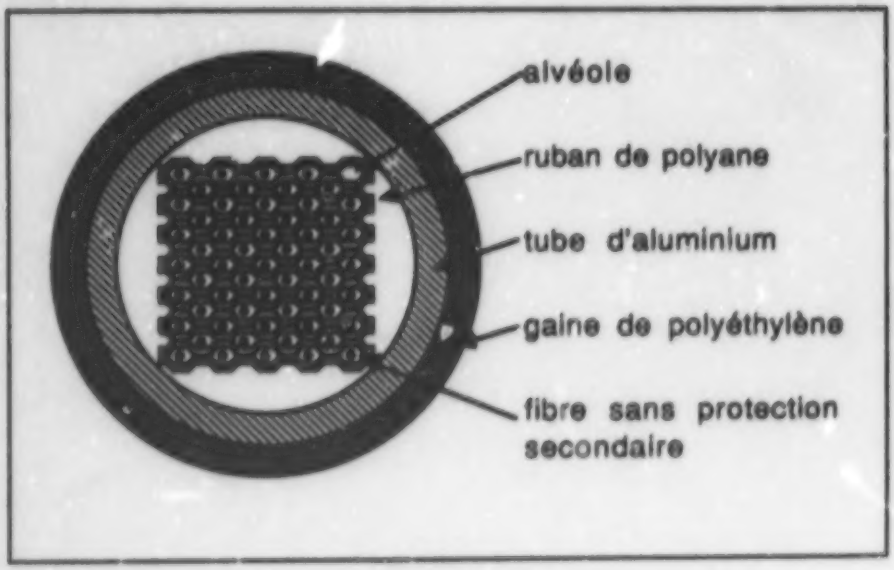


Figure 25 (a)
Câble à structure ruban
Section du câble

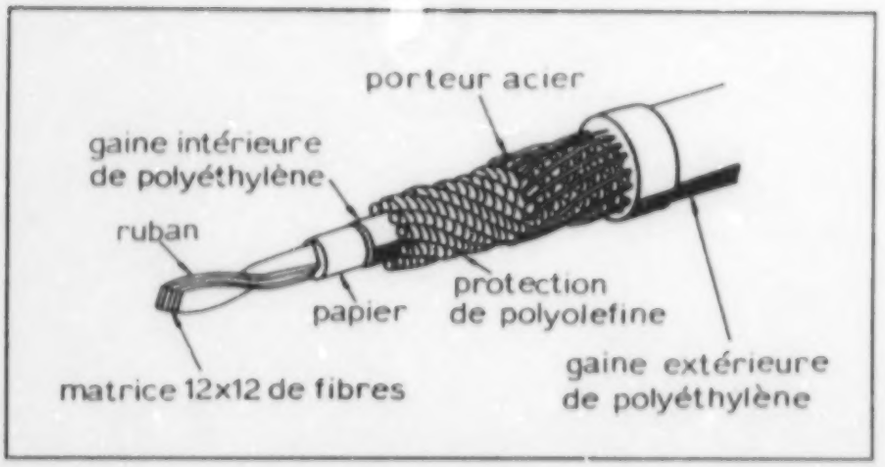


Figure 25 (b)
Câble à structure ruban
Exemple de câble commercial fabriqué par les Laboratoires Bell

2. Connecteurs

Pour qu'on puisse effectivement utiliser les systèmes de communication optique, il faut s'assurer des moyens de raccordement des différents tronçons de câble entre eux et entre les différents dispositifs terminaux, tels les transmetteurs et les détecteurs optiques. En général, on divise les interconnecteurs en trois groupes: (1) les connecteurs démontables qui peuvent être de type fibre-fibre, fibre-dispositif ou fibre-circuit intégré; (2) l'épissure fixe («splice») dans laquelle on obtient le raccordement entre les fibres ou les dispositifs par soudure permanente; (3) les coupleurs qui servent à diviser l'énergie lumineuse en deux ou plusieurs fibres.

Les dimensions des fibres sont faibles (surtout dans le cas des fibres monomodes), ce qui nécessite une grande précision dans l'alignement mécanique et l'emploi d'un outillage de montage spécialisé. Le manque de précision peut entraîner de grandes pertes de raccordement. Les causes de ces pertes sont de deux grands types: intrinsèques et extrinsèques. Celles-ci sont schématisées dans la figure 26. Les pertes intrinsèques sont provoquées par les imperfections que subissent les fibres pendant

leur fabrication: elles sont impossibles à corriger. Les pertes extrinsèques, elles, sont dues à un mauvais alignement. Les causes les plus importantes de ces pertes sont l'écartement et le mésalignement axial, le mésalignement angulaire et les différences d'ouverture numérique et de diamètre du coeur. La présence d'impuretés sur des surfaces transversales ainsi que le manque de perpendicularité de la coupure par rapport à l'axe de la fibre peuvent constituer d'autres sources de pertes.

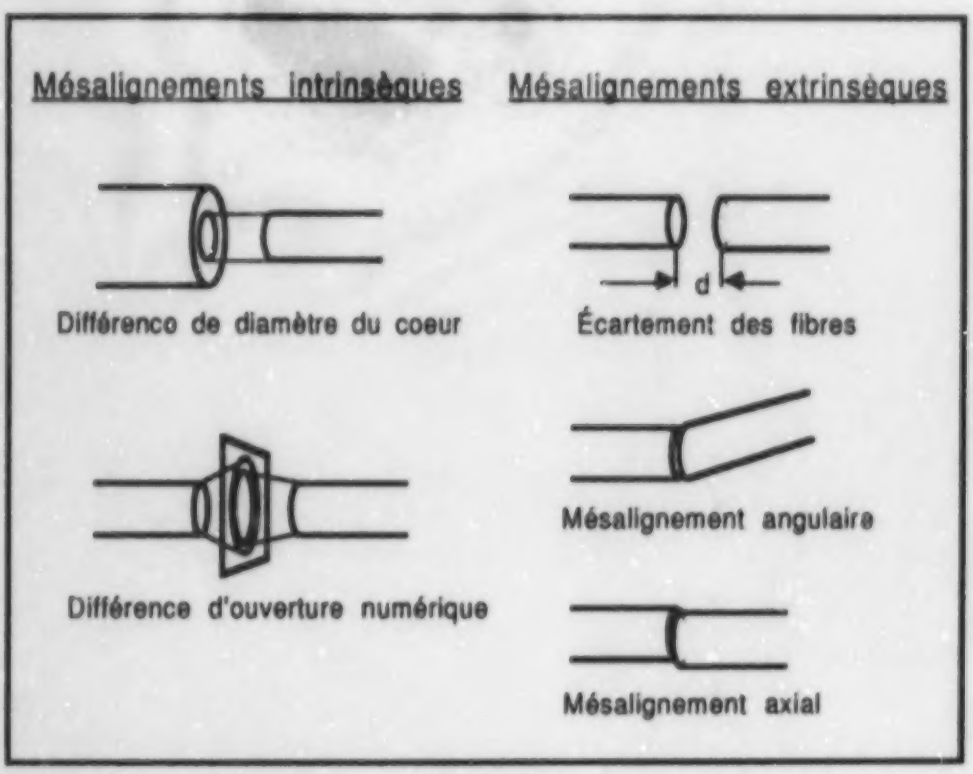


Figure 26
Différents types de mésalignement provoquant les pertes de puissance dans le raccordement des fibres optiques

2.1 Les connecteurs démontables

Les figures 27 (a et b) illustrent deux types de connecteurs démontables fabriqués par les compagnies Newport et Hirschmann. Le montage de ces types de connecteurs est décrit en détail dans l'exercice 9). En général, chaque fournisseur adopte une méthode nettement différente dans la préparation des fibres, mais le principe reste le même. Dans les meilleurs cas les pertes d'une connection sont réduites à la valeur de 0,2dB avec des valeurs typiques de 1 à 2dB par connection.

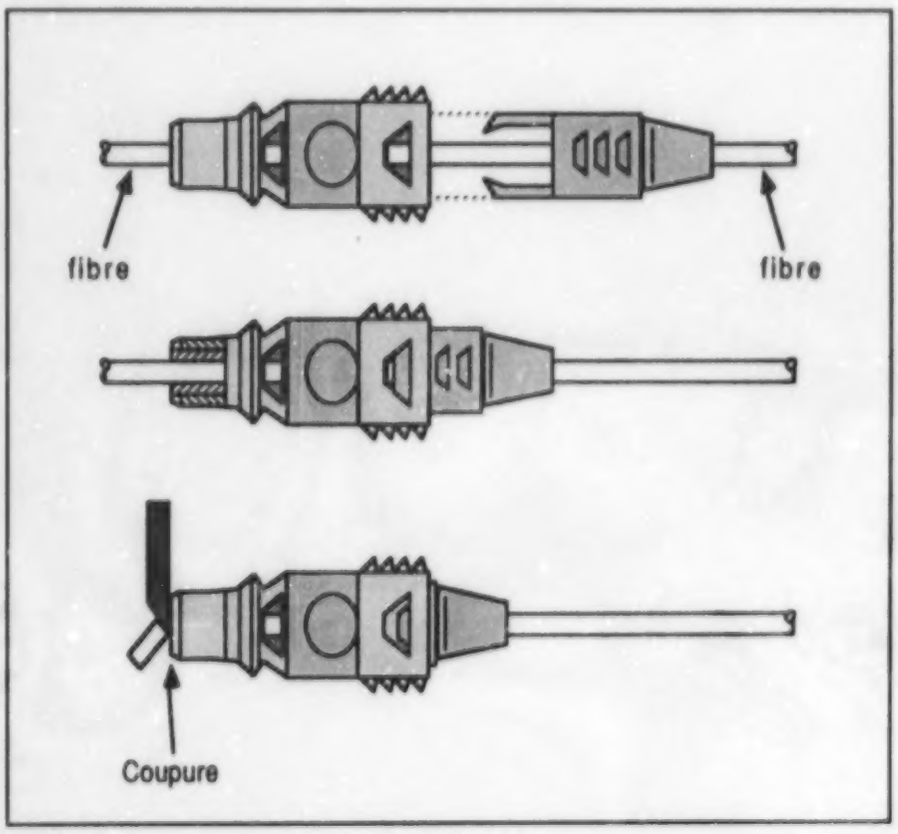


Figure 27 (a)

Exemple de connecteur démontable

Connecteur Hirschmann pour les fibres en plastique

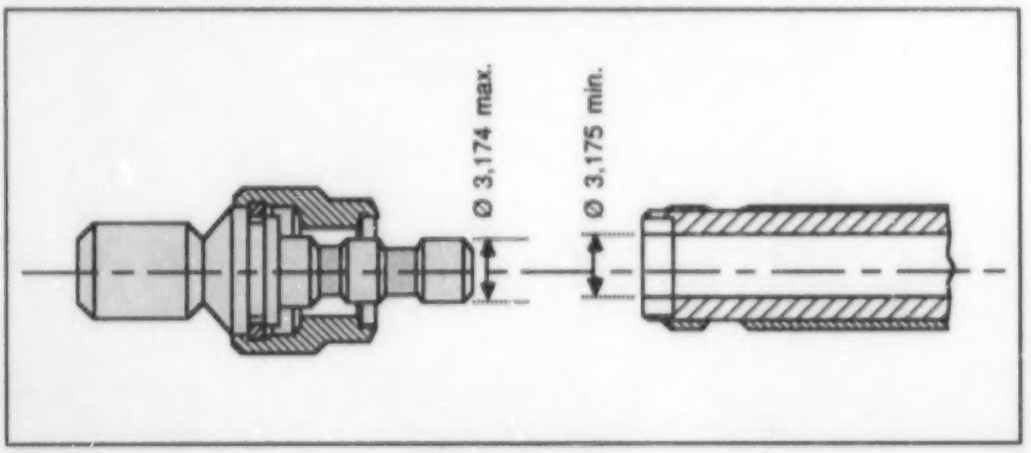


Figure 27 (b)

Exemple de connecteur démontable

Connecteur SMA Newport

2.2 Les épissures fixes

La figure 28 illustre la méthode d'obtention des épissures fixes par soudage. Deux extrémités de fibres, correctement coupées et nettoyées, sont alignées et placées bout à bout. Le chauffage à l'arc électrique permet d'atteindre une température d'environ 2000°C.

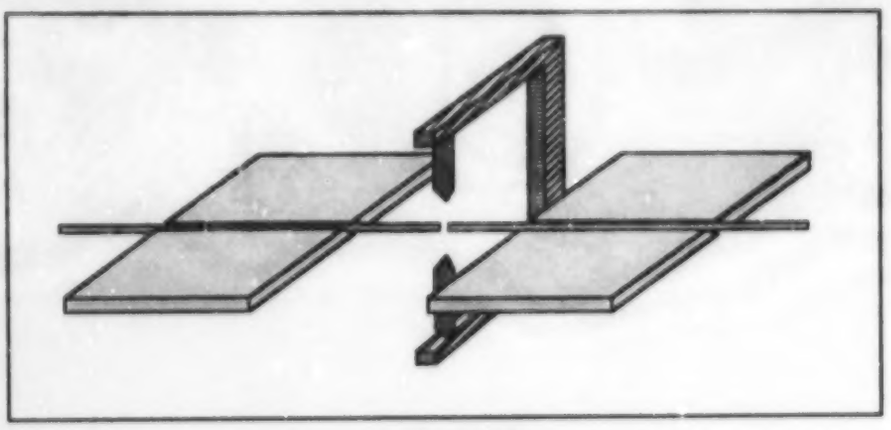


Figure 28

Épissure fixe par soudage à l'arc

À l'aide d'un microscope, le processus peut être contrôlé par un technicien jusqu'au moment où la fusion et la soudure des extrémités sont réalisées. Cette méthode empêche la création d'une mince couche d'air entre les deux fibres tout en diminuant les pertes qui sont généralement de l'ordre de 0,05dB par connection.

3. Coupleurs

Les coupleurs servent à répartir l'énergie lumineuse entre deux fibres ou plus. Le fonctionnement d'un coupleur est illustré à la figure 29. Selon la nature du coupleur, la liaison peut être uni- ou bidirectionnelle. En général, la méthode repose sur la déformation localisée de la fibre principale de façon à exciter par couplage les rayons à fuite. Ces rayons sont ensuite guidés vers une station terminale.

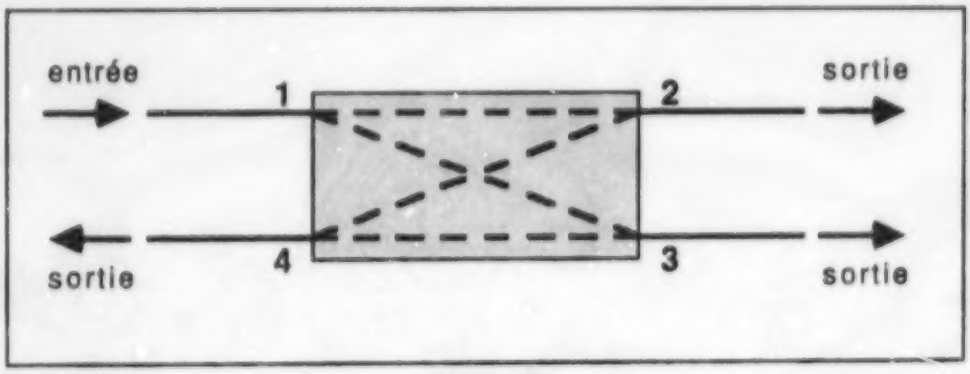


Figure 29
Schéma d'un coupleur bidirectionnel

Pour caractériser un coupleur, il faut préciser au moins 3 paramètres (figure 29):

- le coefficient de couplage: $C = 10 \log (P_1/P_3)$
- la directivité: $D = 10 \log (P_1/P_4)$
- les pertes: $P = 10 \log [P_1/(P_2 + P_3)]$

Plusieurs méthodes existent pour la fabrication de coupleurs optiques. En voici deux:

a) la méthode dite d'attaque chimique: la gaine optique est d'abord presque complètement enlevée par décapage chimique et les coeurs unis sont ensuite mis en contact et protégés par une nouvelle couche de gaine optique;

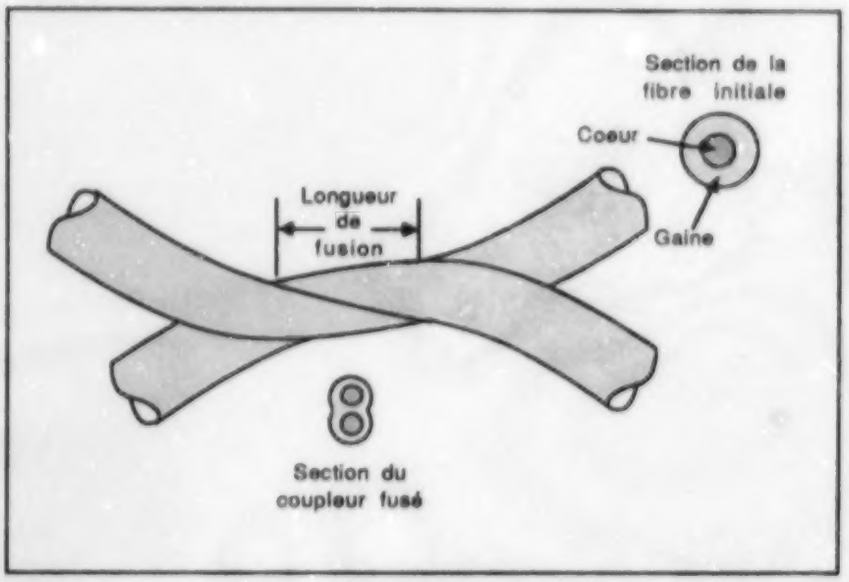


Figure 30
Fabrication d'un coupleur optique par la méthode de fusion

b) la méthode dite de fusion: on applique une certaine tension pour réunir les fibres et on les soumet à la chaleur d'un arc afin de les faire fondre. Ce procédé est représenté à la figure 30. Le diamètre initial de la fibre est indiqué en haut à droite de la figure. Une coupe de la jonction après la fusion montre une diminution de l'épaisseur des fibres.

Ces mêmes méthodes peuvent être utilisées pour fabriquer des coupleurs étoile au moyen desquels la puissance optique peut être partagée également entre 32 fibres différentes.

Chapitre VIII
LASERS

Un LASER (acronyme de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) est une source de lumière cohérente. Il est en général constitué d'un amplificateur d'ondes lumineuses et d'une boucle de réaction formant un résonateur. Tous deux forment un générateur semblable à de nombreux générateurs communs en électricité ou en mécanique. Pour les fins de la communication optique, on utilise uniquement des lasers à semiconducteurs.

1. Lasers à semiconducteurs - introduction

Pour expliquer le fonctionnement des lasers à semiconducteurs, il faut d'abord faire comprendre aux élèves les propriétés de ce type de matériaux. Pour ce faire, on présente le modèle simple des bandes: celui-ci, bien que résultant de phénomènes quantiques compliqués dans le réseau cristallin, peut être facilement assimilé par des élèves et il explique adéquatement l'état de choses.

Ce modèle est présenté à la figure 31. La bande de valence est constituée par l'ensemble des énergies des électrons liés, c'est-à-dire des électrons qui se trouvent retenus à proximité d'un atome par son champ électrique. Ces électrons ne peuvent pas servir de porteurs de charge électrique et les matériaux de pareille structure sont des isolateurs parfaits. La bande interdite représente l'ensemble des énergies non permises. La bande de conduction, quant à elle, représente les énergies associées aux électrons libres. Ces électrons peuvent facilement circuler entre des ions atomiques; le matériau dont la bande est ainsi occupée constitue un conducteur idéal.

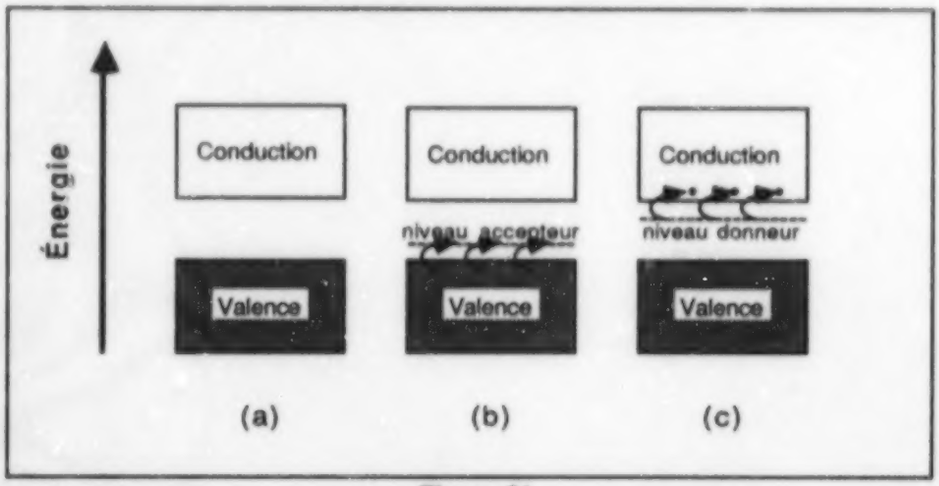


Figure 31

Modèle des bandes dans un semiconducteur

a) semiconducteur intrinsèque

b) semiconducteur de type p

c) semiconducteur de type n

Dans les matériaux semiconducteurs, toutefois, la bande de conduction peut être soit vide, soit partiellement occupée, selon la situation énergétique du cristal. Sans excitation, tous les niveaux énergétiques de la bande de valence sont occupés et la bande de conduction reste vide. Il est quand même possible aux électrons de franchir la bande interdite à condition qu'ils puissent accumuler assez d'énergie (thermique, électrique ...) provenant d'une source extérieure. L'électron qui quitte la bande de valence laisse à sa place un espace vide (un «trou»), c'est-à-dire un manque d'électrons qui peut être considéré comme un porteur de charge positive (+e).

L'électron devient cependant lui-même une charge libre négative (-e). Tous les deux, appelés couple électron-trou, peuvent se déplacer dans des directions opposées et, par ce fait, contribuer à la création d'un courant électrique.

La largeur de la bande interdite constitue donc le paramètre fondamental d'un semiconducteur. Le tableau 1 donne la largeur de bande interdite W_g en électronvolt (eV) pour quelques matériaux semiconducteurs:

Matériau	Si	Ge	GaAs	InSb
Wg (eV)	1,12	0,72	1,43	0,18
λ_c (nm)	1100	1700	870	6890

Tableau 1

Largeur de bande interdite et longueur d'onde critique pour certains matériaux utilisés pour les diodes laser

Il existe aussi un processus réciproque par rapport à la génération des couples électron-trou — processus appelé recombinaison — qui fait disparaître ce couple. Pour la température donnée, la génération et la recombinaison sont en équilibre, ce qui détermine le nombre de porteurs de charge. Si la température augmente, le nombre des électrons capables de franchir la bande interdite augmente également et l'équilibre va s'établir à une concentration plus élevée de porteurs libres.

Les matériaux semiconducteurs dans lesquels tous les porteurs libres sont excités uniquement par la génération des couples sont appelés semiconducteurs intrinsèques. Les concentrations (nombre des porteurs libres par unité de volume) d'électrons (n) et de trous (p) sont alors égales ($n = p = n_i$) et déterminent la concentration intrinsèque n_i. Cette concentration intrinsèque, à une température donnée, constitue le deuxième paramètre important d'un semiconducteur.

On peut introduire dans le réseau cristallin d'un semiconducteur (Si, Ge ou GaAs) des atomes nouveaux de façon à augmenter la concentration d'un seul type de porteurs. On appelle cela le «dopage» du semiconducteur. Si l'atome d'un dopant a des électrons dont les niveaux énergétiques sont situés dans la bande interdite mais à proximité de la bande de conduction, dans ce cas, à la température ambiante, toutes les impuretés seront ionisées et les électrons pourront facilement faire le passage à la bande de conduction du semiconducteur. Ce type de dopant est appelé donneur: il donne des électrons libres sans augmenter le nombre de porteurs de charges positives. Le semiconducteur dopé de cette façon est de type «n». De façon analogue,

on peut obtenir un semiconducteur de type «p» en introduisant les atomes accepteurs, dont le niveau énergétique des électrons est situé dans la bande interdite à proximité de la bande de valence. Ceux-ci pourront alors facilement absorber les électrons provenant de la bande de valence; de leur côté, ces derniers laisseront des places vides (des trous) dans cette bande, tout en créant des porteurs libres chargés positivement (+e).

Dans chaque semiconducteur il y aura donc des porteurs plus nombreux — majoritaires — et d'autres moins nombreux — minoritaires --, de manière à satisfaire la relation:

$$n \cdot p = n_i^2$$

Un état énergétique très important d'un semiconducteur est appelé inversion d'états (Fig. 32). Il correspond à la situation dans laquelle le système est excité par une source d'énergie extérieure et un certain nombre de porteurs libres est généré: par exemple, des électrons dans la bande de conduction.

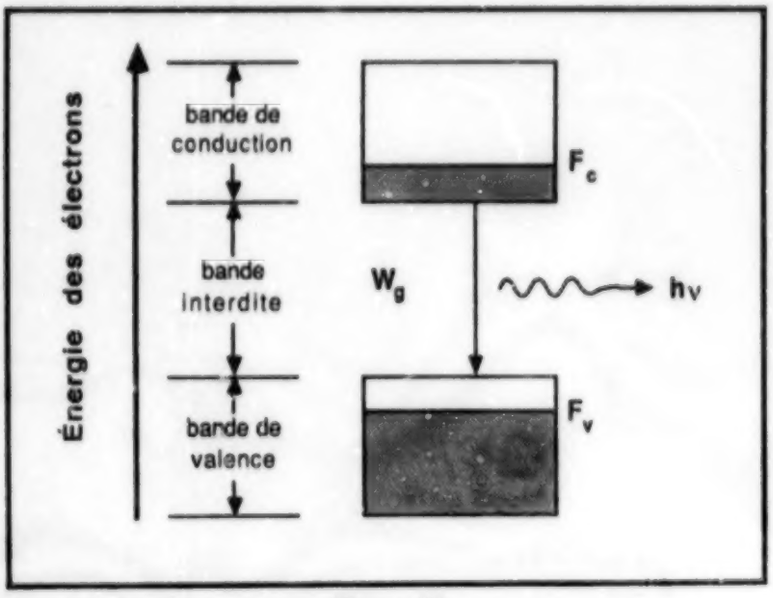


Figure 32
Inversion d'états dans un semiconducteur

Ces porteurs ont tendance à revenir dans la bande de valence; cette recombinaison est liée à l'émission d'énergie sous forme de quantum, énergie égale à la largeur de la bande interdite:

$$W_g = h\nu = \frac{h\,c}{\lambda}$$

où W_g = largeur de la bande interdite
h = constante de Planck
ν = fréquence
c = vitesse de la lumière
λ = longueur d'onde

Ce processus, appelé émission spontanée, peut encore se transformer en émission stimulée (l'énergie d'un quantum peut être plus grande que celle de la bande interdite) s'il y a densité suffisante de photons dans la zone de recombinaison. Les émissions spontanées et stimulées sont nécessaires au fonctionnement des diodes électroluminescentes (DEL) et des diodes lasers (DL).

Pour comprendre comment ces dispositifs fonctionnent, il est souhaitable de commencer par examiner le fonctionnement d'une jonction p-n, constituant une diode ordinaire à semiconducteur.

Comme le montre la figure 33, la jonction p-n est créée dans un cristal par deux zones voisines, l'une dopée p et l'autre dopée n. En l'absence de champ électrique extérieur, les porteurs de charge ont tendance à se diffuser vers les régions où ils sont moins nombreux: les électrons provenant de la zone n vont alors se diffuser vers la zone p, et vice-versa. À la suite de cette diffusion, la neutralité du cristal est détruite et un champ électrique se forme et s'oppose à son tour à la diffusion successive. Ces deux phénomènes, la diffusion et le champ électrique, se complètent finalement et un état d'équilibre caractérisé par la différence des potentiels V_0 entre deux zones n et p est établi.

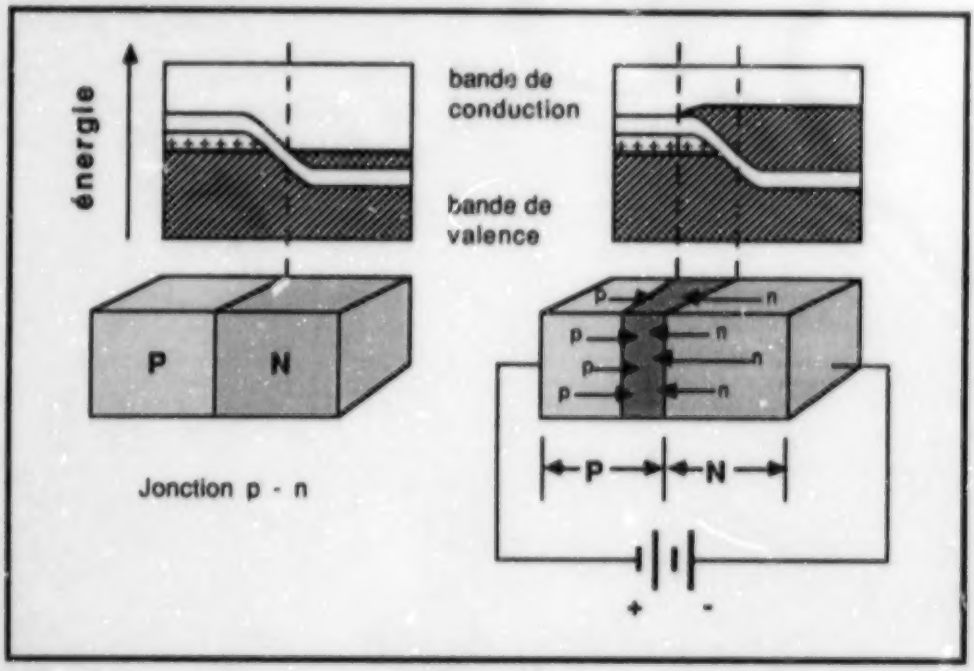


Figure 33

Modèle des bandes et schéma d'une jonction p-n

On peut facilement contrôler cette barrière en appliquant aux extrémités du cristal une tension externe U. Elle s'ajoute à la barrière V_0 et, selon son signe, l'augmente (polarisation en inverse) ou la diminue (polarisation en direct). La caractéristique courant-tension d'une diode p - n (fig. 34) peut donc être décrite par l'équation:

$$I = I_s \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1\right)$$

où
- I = courant à la tension U
- I_s = courant de saturation
- q = charge d'un électron (= -e)
- k = constante de Boltzmann
- T = température en Kelvin

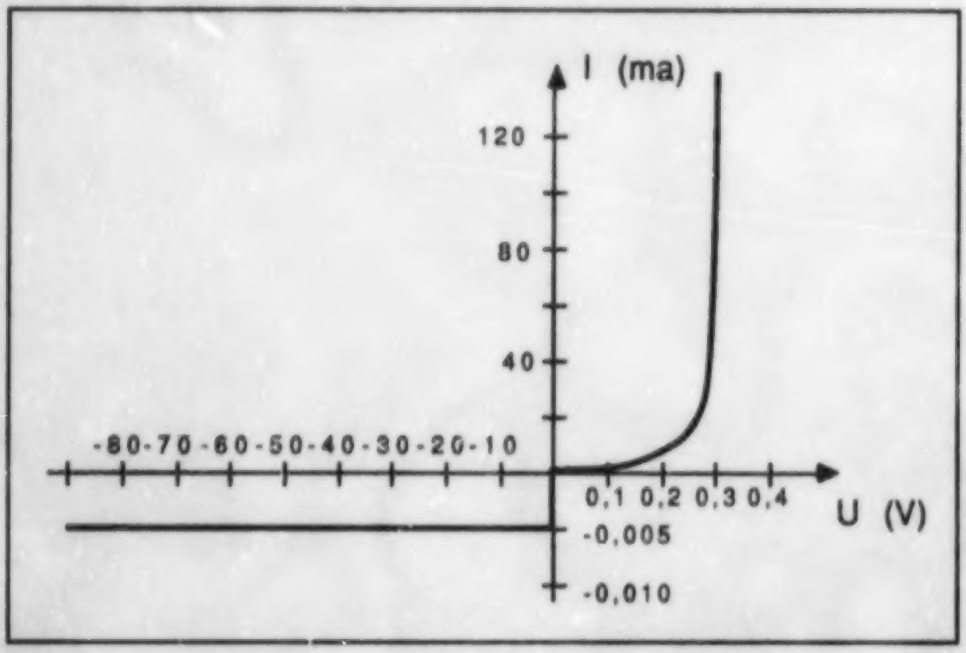


Figure 34
Caractéristique courant-tension d'une diode p-n à semiconducteur

2. Diodes électroluminescentes (DEL)

Si la jonction p - n est polarisée en direct, les très nombreux porteurs majoritaires sont injectés dans les zones de types opposés où ils augmentent radicalement les concentrations de porteurs minoritaires. Cela produit à la jonction une inversion des états (ou des populations) et provoque une émission spontanée d'énergie lumineuse dont la longueur d'onde centrale est déterminée par la largeur de la bande interdite. La quantité de lumière émise dans toutes les directions est proportionnelle au nombre de couples électron-trou qui se recombinent. Ce phénomène s'appelle recombinaison radiative. Les dispositifs qui sont construits en vue d'employer l'émission spontanée s'appellent diodes électroluminescentes (DEL).

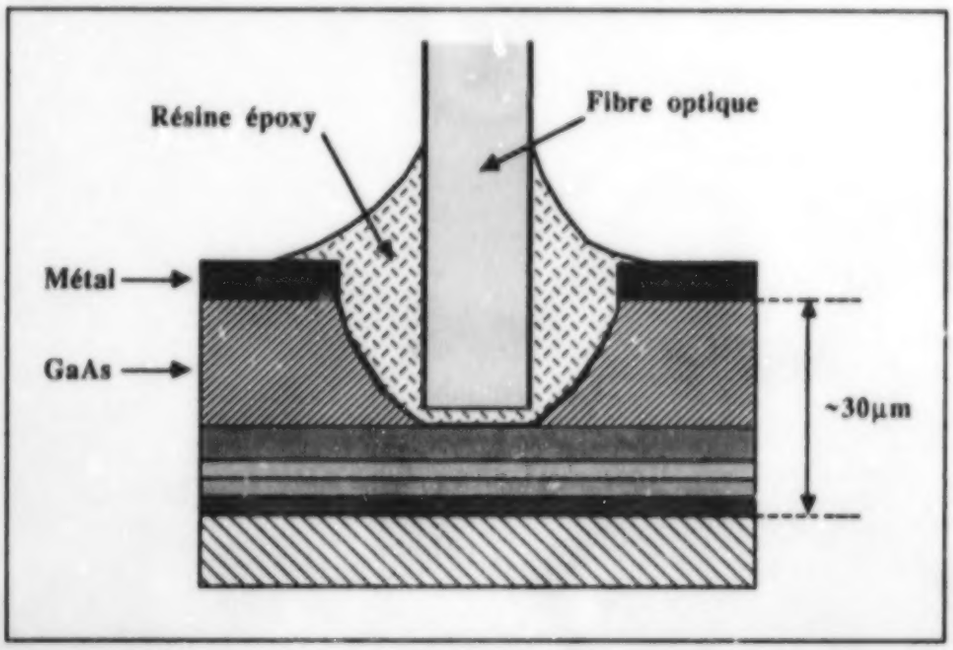


Figure 35

Construction d'une diode électroluminescente couplée à une fibre optique

La figure 35 montre comment est construite une diode DEL couplée à une fibre optique. La zone de recombinaison est d'une épaisseur d'environ 1 µm. Pour éviter l'absorption parasite des photons émis, la couche supérieure est creusée chimiquement de façon à pouvoir introduire une fibre optique très près de la zone émissive. Les diodes DEL sont caractérisées par une largeur spectrale de 20 à 70 nm, beaucoup plus grande que celle des diodes lasers.

Leur rendement de couplage avec une fibre optique est très médiocre (de 1 à 10%) à cause de la répartition omnidirectionnelle du faisceau émis. Leur technologie est cependant assez simple, elles coûtent beaucoup moins cher que les diodes laser et elles ont des paramètres assez intéressants (par exemple: leur puissance émise est de 1µW avec une bande passante de 100 MHz) pour qu'on puisse les utiliser dans les liaisons optiques courtes et de faible débit.

3. Diodes lasers (DL)

Pour créer un laser, il faut provoquer dans le cristal un phénomène d'émission stimulée. Celle-ci se produit si l'intensité de la lumière dépasse une certaine valeur critique. Afin d'augmenter le gain du système de manière suffisante, il faut réaliser dans le système le confinement des porteurs électroniques et des photons. Ce qu'on obtient en pratique par l'introduction d'un dopage modifié dans une certaine partie de la jonction (constituée par une couche mince), de façon à provoquer une diminution locale de la bande interdite du cristal (Fig. 37). Dans le cas d'une diode laser faite d'arséniure de gallium, cette modification s'obtient en changeant la concentration d'aluminium ajouté à l'alliage pendant le processus de cristallisation. Un modèle de bandes ainsi qu'un exemple de la structure souvent utilisée, appelée double hétérostructure, sont illustrés dans les figures 36 et 37.

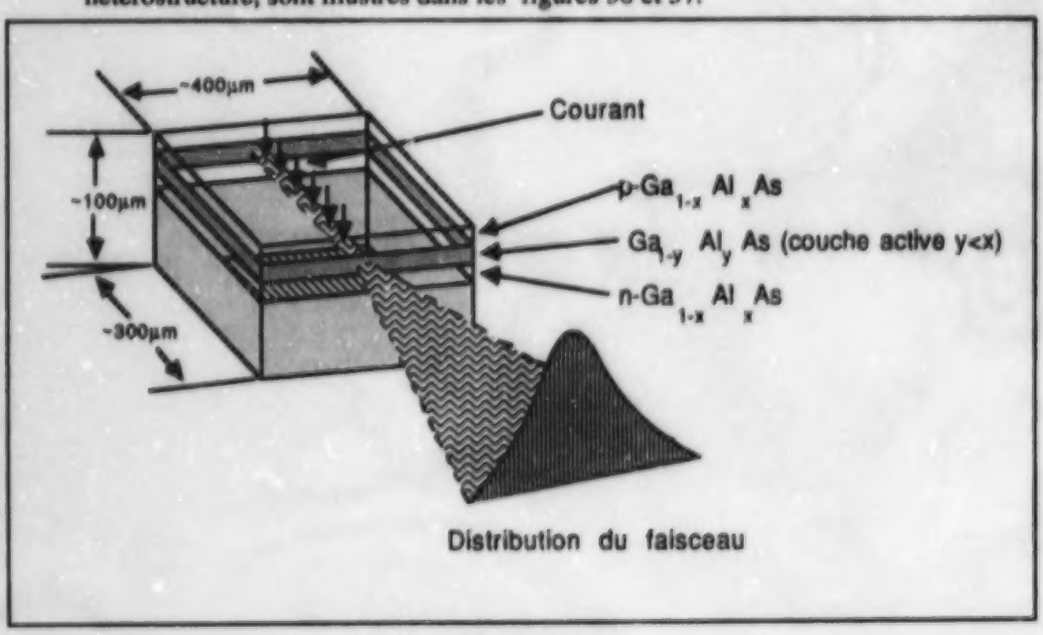


Figure 36

Construction d'une diode laser dans un cristal d'arseniure de gallium

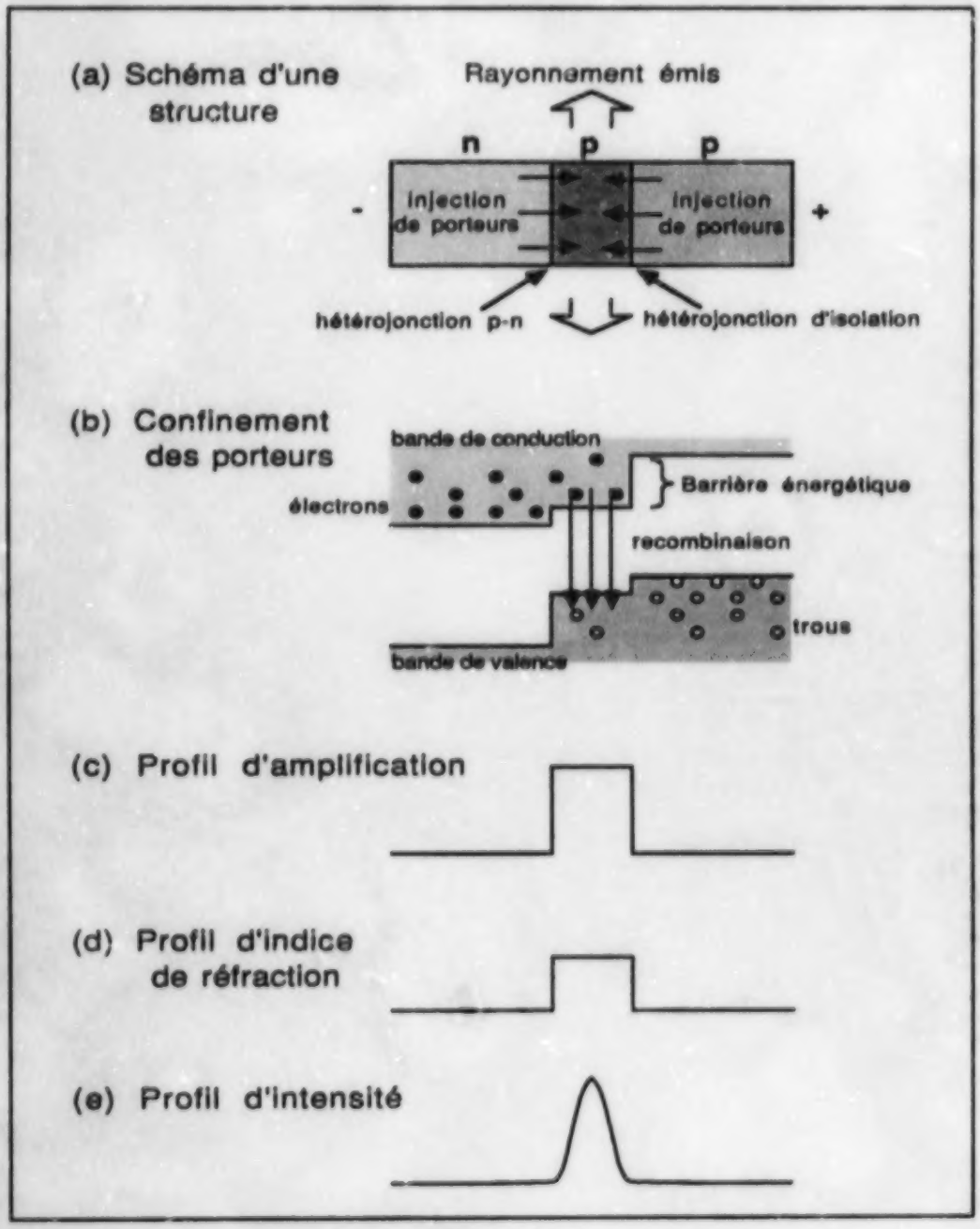


Figure 37

Diode laser à double hétérostructure – a) schéma; b) confinement des porteurs; c,d,e) profils d'amplification, d'indice de réfraction et d'intensité.

La zone de recombinaison a une concentration de Al inférieure, ce qui produit non seulement une diminution de la bande interdite, mais aussi, heureusement, une augmentation de l'indice de réfraction par rapport aux couches voisines. Cela favorise le guidage de la lumière comme dans le cas d'une fibre optique ordinaire.

Type	Compagnie	Longueur d'onde (λ)	Largeur spectrale ($\Delta\lambda$)	Puissance maximale	Courant typique de fonctionnement	Commentaires
LCW-10 (diode laser)	Laser Diode Inc (Canada)	830 nm	2.5 nm	14 mW	90 mA	Opération continue
LD-68 (diode laser)	Laser Diode Inc (Canada)	904 nm	3.5 nm	20 W	20 A	Opération en impulsion
LDT-362 (DEL)	Laser Diode Inc (Canada)	1300 nm	70 nm	200 µW	200 mA	Opération continue "pig tail" avec 1 m de fibre 50/125µm
LT015MD (diode laser)	Sharp (Japon)	830 nm	2.5 nm	40 mW	100 mA	Opération continue
HE8801 (DEL)	Hitachi (Japon)	880 nm	30 nm	20 mW	120 mA	Opération continue
SDL-2450-C (diode laser)	Spectre Diode Labs (USA)	810 nm	10 nm	500 mW	1600 mA	Opération continue

Tableau 2

Principaux paramètres des diodes électroluminescentes ainsi que des diodes laser fabriquées par différentes compagnies

Pour amplifier les modes désirés et diminuer les modes parasites, la jonction est normalement équipée en système de miroirs, et constituée par les faces clivées du monocristal, appelé résonateur. Ce résonateur est généralement de type Fabry-Perot.

Les paramètres techniques des différentes diodes électroluminescentes et des diodes lasers fabriquées par les compagnies Sharp, Hitachi, Laser Diode Inc. et Spectre Diode Labs sont présentés au tableau 2.

4. Lasers à He-Ne

C'est actuellement le modèle de laser le plus répandu, même s'il ne trouve pas d'applications directes en télécommunications. le médium est constitué d'un mélange gazeux composé essentiellement d'hélium (90%) et de néon (10%). L'hélium, excité par le courant électrique, communique par collisions son énergie au néon dans lequel une émission laser peut se présenter. Les miroirs qu'on voit à la figure 38 permettent de sélectionner une des trois longueurs d'onde possibles. La raie rouge à 632,8 nm est la seule située dans la gamme visible.

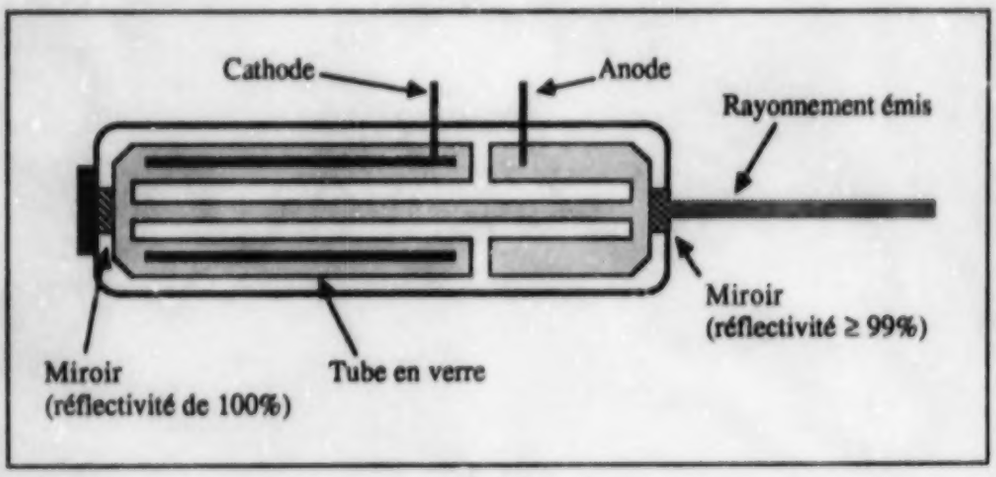


Figure 38
Schéma d'un laser à He-Ne

Chapitre IX
PHOTODÉTECTEURS

1. Généralités

Le principe de fonctionnement des photodétecteurs est basé sur le phénomène physique réciproque de celui utilisé dans les sources de lumière. L'énergie d'un photon est absorbée par un électron et cette énergie lui permet de se libérer de l'attraction de l'atome. Il passe alors dans la bande de conduction. Ce phénomène génère une paire de porteurs libres qui peut être enregistrée sous forme d'un photo-courant aux bornes d'un dispositif à semi-conducteur.

Les propriétés des photodétecteurs vont surtout dépendre de la nature du matériau utilisé (la largeur de la bande interdite détermine la longueur d'onde maximale qui peut être absorbée par un dispositif donné — voir aussi le tableau 3) et de la structure du dispositif qui détermine, par exemple, la puissance maximale, les bruits et la rapidité.

Matériau	Si	Ge	GaAs	$Ga_xIn_{1-x}As$	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$
Wg (eV)	1,1	0,72	1,43	1,43 à 0,36	1,35 à 0,36
λ_c (nm)	1100	1700	870	870 à 3440	920 à 3440

Tableau 3

Largeur de bande interdite et longueur d'onde critique pour certains matériaux utilisés pour les détecteurs

Les paramètres les plus importants des photodétecteurs sont les suivants:

- rendement quantique η, qui caractérise le rapport du nombre de couples électron-trou générés sur le nombre de photons incidents. Le photo-courant obtenu peut être alors déterminé comme:

$$I_{ph} = q \eta I_0$$

où I_{ph} = intensité du photo-courant
I_0 = nombre de photons par unité de temps
q = charge d'un électron

- rapidité, caractérisée par le temps de réponse d'une diode.

- sensibilité qui caractérise le rendement global de transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique:

$$S = \frac{I_{ph}}{I_0 \, h\nu}$$

où $h\nu$ = énergie d'un photon
(h est la constante de Planck = $6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J·s et
ν, la fréquence de l'onde lumineuse)
I_0 = flux de photons

2. Les divers types de photodiodes

2.1 La photodiode à jonction p - n

La figure 39 donne le schéma de fonctionnement d'une photodiode à jonction p - n. Le dispositif est polarisé en inverse de façon à permettre l'évacuation rapide des porteurs libres créés par la lumière dans la zone dite «zone de déplétion». Ces porteurs sont ensuite collectés aux bornes de la zone déplétée et constituent le photo-courant.

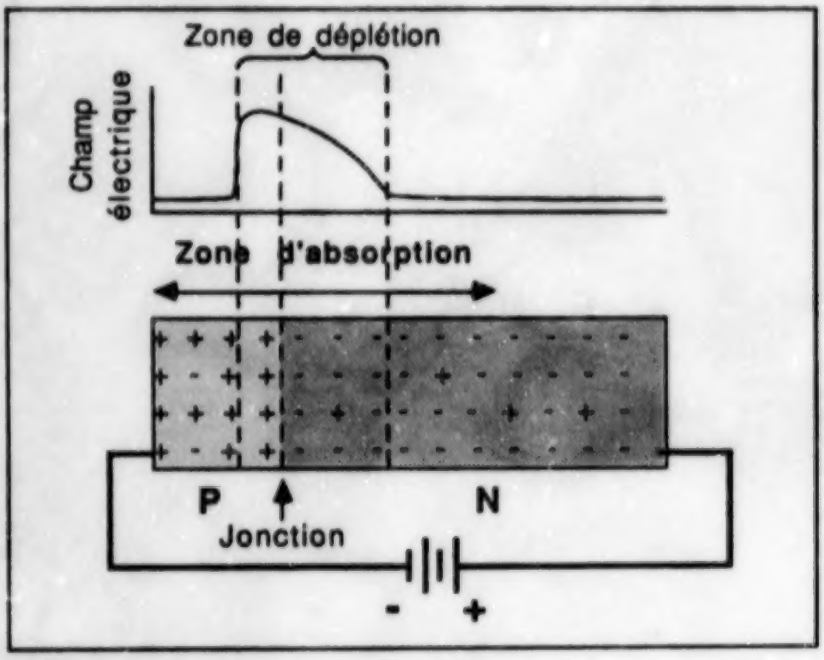


Figure 39

Schéma de fonctionnement d'une photodiode à jonction p-n

2.2 La photodiode PIN

Pour améliorer le rendement quantique et la sensibilité du dispositif, il faut que la zone de déplétion soit plus grande que la région d'absorption des photons. Présentée à la figure 40, la construction qui permet d'obtenir une telle configuration, est appelée diode p - i - n. Les deux régions fortement dopées n et p sont séparées par la région du matériau intrinsèque i.

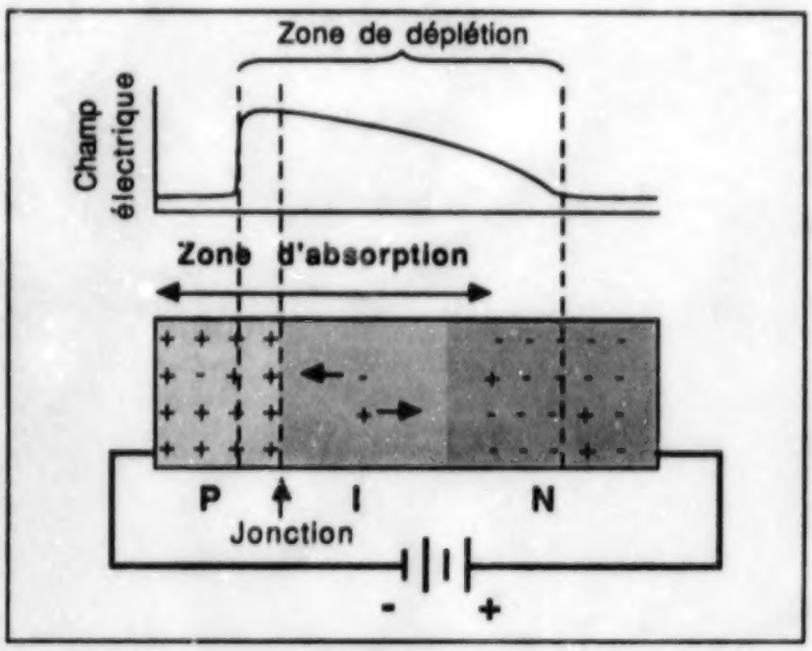


Figure 40

Schéma de fonctionnement d'une photodiode p-i-n

Les dimensions de la zone de déplétion, qui s'étend profondément dans la région intrinsèque, permettent d'absorber tous les photons incidents. Toutefois, un compromis est nécessaire: pour que la diode soit rapide, il faut que la couche intrinsèque soit assez mince, ce qui est en contradiction avec les exigences d'un rendement quantique élevé.

2.3 La photodiode à avalanche (PDA)

Pour améliorer encore les performances sans être obligé de faire le compromis mentionné ci-dessus, on peut donner un gain interne au dispositif. Sous l'influence d'un champ électrique suffisamment fort, on peut dépasser le seuil d'ionisation du matériau: chaque porteur de charge peut être une source supplémentaire de porteurs en entrant en collision avec des atomes du réseau. Si le phénomène devient cumulatif, la conduction se fait par avalanche. Ainsi, même si la puissance lumineuse est très faible, le courant généré à la sortie du dispositif peut être suffisamment grand.

Le tableau 4 présente les principaux paramètres des photodiodes fabriquées par différentes compagnies.

Type	Compagnie	Type de détecteur	Surface active	Longueur d'onde de sensitivité max.	Sensitivité quantique	Commentaires
SMD-10P	Seiko Instruments & Electronics Ltd (Japon)	Si, PIN	1,08 mm x 1,15 mm	880 nm	0,6 mA/mW	
HR1101	Hitachi Ltd (Japon)	InGaAsP, PIN	100 µm diamètre	1300 nm	0,7 mA/mW	miniature
PD1002	Mitsubishi Electronics (Japon)	Si Avalanche	30 µm diamètre	800 nm	0,45 mA/mW	En version "pig tail, devient un module FU-02AP-N
G1117	Hamamatsu Photonics K.K. (Japon)	Photodiode GaAsP	7,26 mm^2	610 nm	0,30 mA/mW	
S1336-5BK	Hamamatsu Photonics K.K. (Japon)	Photodiode Si	5,6 mm^2	920 nm	0,40 mA/mW	Utilisable de 320 à 1100 nm

Tableau 4

Principaux paramètres des photodiodes fabriquées par différentes compagnies

Chapitre X
MODULATION DE LA LUMIERE

1. Généralités

La conception d'un système de transmission par fibre optique se fonde sur la possibilité d'imprimer l'information sur la lumière, celle-ci servant uniquement de porteur de cette information. Ce processus peut être réalisé à l'aide de la modulation.

En général, le modulateur est un système capable de modifier les paramètres de la lumière en fonction du signal de commande. Les paramètres modifiables de la lumière sont nombreux: amplitude (intensité), polarisation, direction de la propagation, fréquence, phase, répartition des modes. Tout cela peut être contrôlé et modifié, selon les besoins, à l'aide de signaux électriques, acoustiques, magnétiques, mécaniques ou optiques.

2. Modulation directe

Il y a plusieurs façons d'obtenir une lumière modulée, mais on peut les classer toutes en deux groupes: la modulation directe et la modulation externe. Un exemple de modulation directe pouvant utiliser la diode DEL ou DL est représenté à la figure 41. Le dispositif peut fonctionner soit en mode numérique (courant inférieur au courant de seuil — pas d'émission ou 0 logique; courant supérieur au courant de seuil — il y a émission ou 1 logique), soit en mode analogique (l'intensité de la lumière peut être modifiée en fonction du courant si celui-ci est supérieur au courant de seuil).

Pour les fréquences de modulation les plus élevées, on préfère les systèmes de modulation externe dans lesquels la lumière émise par une source non-modulable passe ensuite par le modulateur séparé.

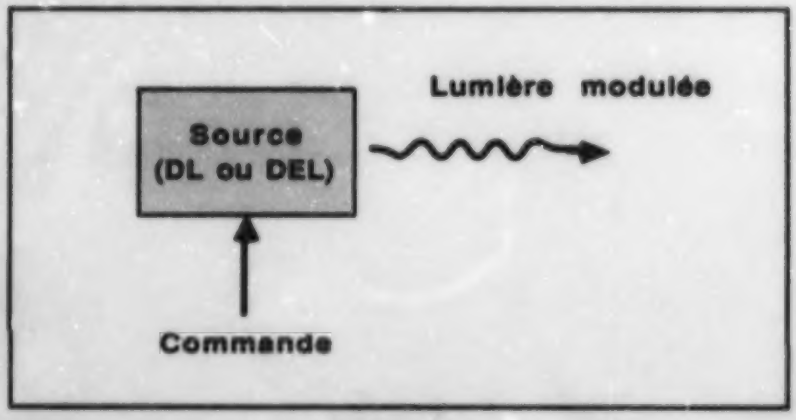


Figure 41

Modulation directe

3. Modulation électro-optique

Un exemple de modulaion électro-optique est donné à la figure 42. Cette modulation est basée sur le phénomène de biréfringence: les coefficients de réfraction de deux composantes E_x et E_y d'une onde électrique sont différents et chaque composante dépend de façon différente d'un champ électrique extérieur. Par conséquent, la polarisation et la phase de la lumière sortant du cristal biréfringent dépendront du champ électrique appliqué aux bornes du cristal.

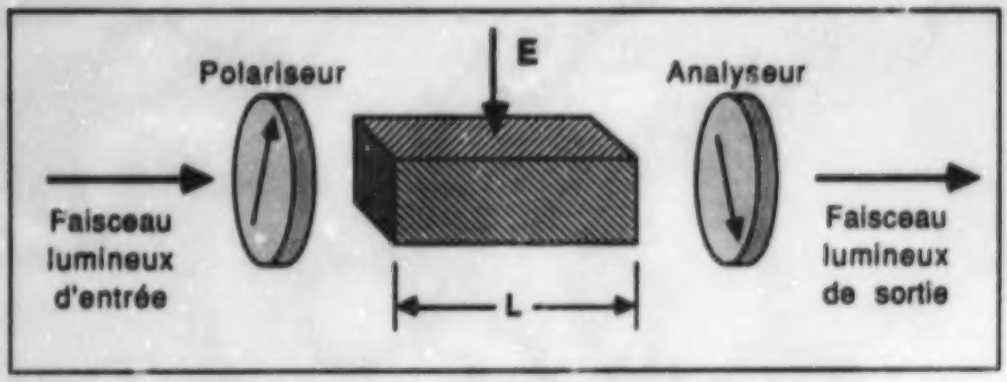


Figure 42

Modulation électro-optique

4. Modulation acousto-optique

L'autre exemple de modulation externe est la modulation acousto-optique. Le principe physique de cette modulation est illustré à la figure 43. Dans le milieu constitué par un transducteur piézoélectrique, on excite une onde acoustique à l'aide d'impulsions électriques. Cette onde, progressive ou stationnaire, provoque des déformations locales qui entraînent ensuite des variations de l'indice du matériau. Lorsqu'elles sont périodiques, ces variations constituent un réseau de diffraction pour le faisceau lumineux incident. L'angle de déviation du faisceau émergent varie avec la longueur d'onde de la lumière et il est facile de le commander de l'extérieur au moyen de la fréquence acoustique.

Pour obtenir les fréquences de modulation élevées (en GHz) nécessaires à l'augmentation du nombre de bits transmis par unité de temps, il faut diminuer radicalement les dimensions des dispositifs. Des procédés récents d'optique intégrée utilisent les techniques de couches minces déjà mises au point en électronique pour fabriquer les dispositifs à semi-conducteurs et les circuits intégrés. Une technologie pour la fabrication de modulateurs basés sur des cristaux de $LiTaO_3$ ou de $LiNbO_3$ est en plein développement dans les laboratoires de recherche.

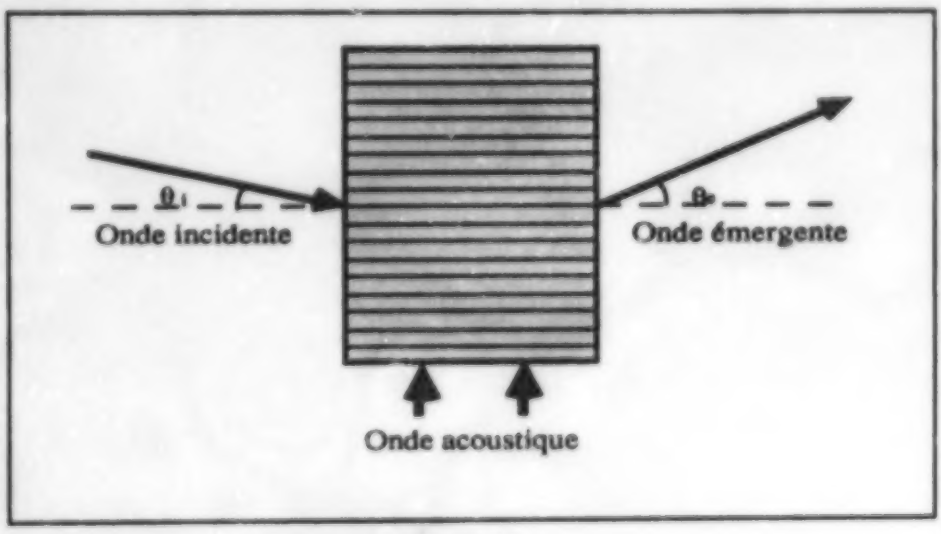


Figure 43

Modulation acousto-optique

Chapitre XI

LIAISONS PAR FIBRES OPTIQUES

1. Généralités

Grâce à leurs excellentes propriétés (que nous avons étudiées au chapitre VI du *Guide*), les fibres optiques sont très bien adaptées à la transmission d'informations sous forme de signaux optiques.

La conception d'un système de transmission par fibres optiques est bien sûr déterminée par les besoins de l'utilisateur. À cette fin, il est nécessaire de connaître, en particulier:

a) la nature du signal à transmettre (analogique ou numérique);
b) la bande passante du signal ou son débit;
c) la distance de transmission qui détermine la longueur des câbles;
d) la configuration du système (par exemple: liaison en série, parallèle ou en étoile).

Les systèmes les plus avancés sont présentement les systèmes de transmission à grande distance grâce auxquels on souhaite envoyer le plus grand nombre possible de bits par unité de temps à la plus grande distance possible. Dans le marché mondial, on observe quand même une saturation récente du nombre d'implantations de grands systèmes.

L'intérêt augmente cependant rapidement dans le domaine des réseaux locaux (c'est-à-dire, des réseaux LAN - Local Area Networks), dans lesquels la transmission des données, bien que parfois très spécialisée, se fait uniquement dans un lieu limité (à l'intérieur d'un bâtiment, par exemple).

Les conditions d'exploitation des systèmes de télécommunication et des systèmes LAN peuvent être très variées, ce qui entraîne une grande diversification des réseaux de distribution de données ainsi que des configurations de systèmes.

2. Décomposition de la liaison

Dans chaque réseau de communication, l'élément de base est fourni par une liaison dite point-à-point, dont le schéma synoptique est présenté à la figure 44.

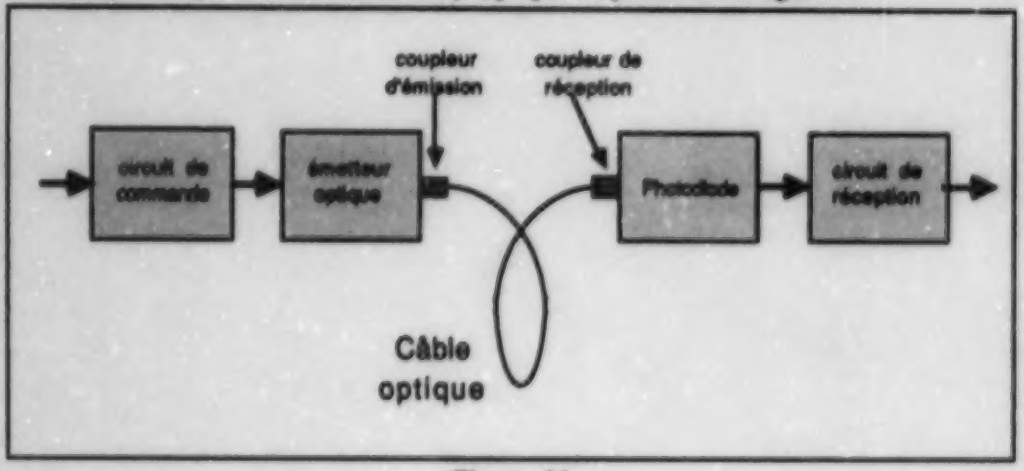


Figure 44

Schéma synoptique d'une liaison point-à-point

Les éléments constitutifs d'une telle liaison, c'est-à-dire les émetteurs, les détecteurs, les fibres, les coupleurs et les modulateurs ont déjà été présentés dans notre *Guide*. Comme nous l'avons vu, la transmission typique est basée normalement sur la modulation numérique d'intensité de la lumière et les distances maximales sont déterminées par les pertes totales dans le système. Le tableau qui suit présente les pertes typiques dont il faut tenir compte dans la conception d'un projet de système de communication:

- pertes de couplage entre une source de lumière et une fibre : jusqu'à 4 dB
- pertes dans un connecteur démontable : jusqu'à 2 dB
- pertes dans une épissure fixe : jusqu'à 0,1 dB
- pertes dans une fibre : jusqu'à 0,5 dB/km
- pertes de sortie : jusqu'à 3 dB

On peut donc estimer le total des pertes du système à partir des pertes caractéristiques des divers éléments constitutifs de ce système.

3. Distribution des données

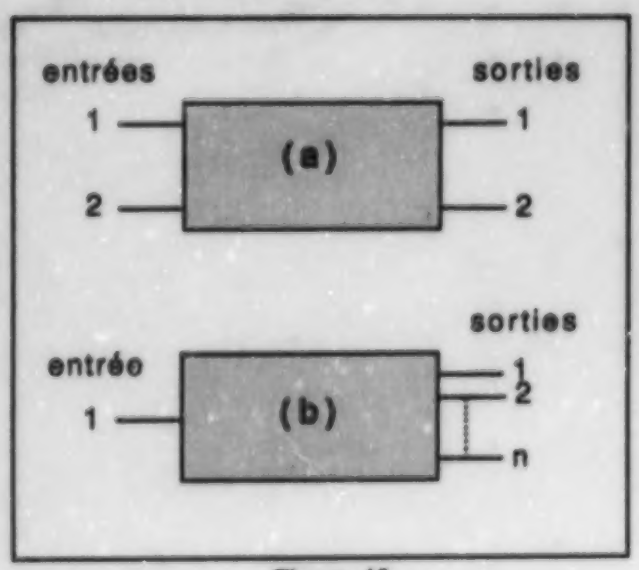


Figure 45

Exemples de coupleurs utilisés dans les réseaux optiques de communication

a) coupleur de type 2 x 2

b) coupleur de type 1 x n

Pour mettre sur pied une architecture plus complexe qu'une liaison point-à-point, il faut diviser le signal optique en utilisant des coupleurs (voir figures 29 et 30). Ceux-ci sont principalement de type 2 x 2 ou de type 1 x n, tel qu'indiqué à la figure 45. Ces coupleurs peuvent être fabriqués en utilisant des fibres multimodes, monomodes ou même des fibres très spécialisées, telles les fibres qui préservent la polarisation de la lumière.

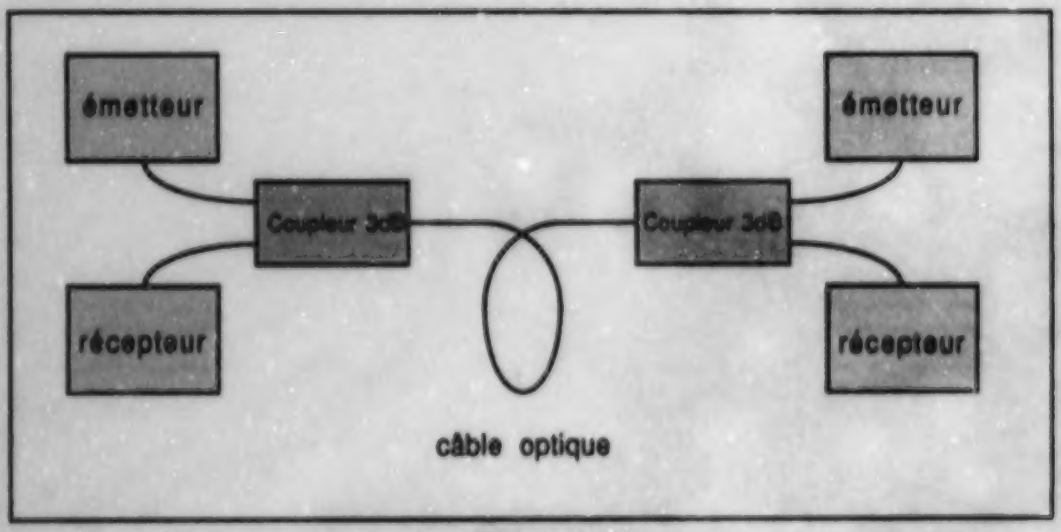


Figure 46

Système bidirectionnel de communication optique

La figure 46 présente un système bi-directionnel de communication de type T (Tee Network), système qui exige l'emploi de deux coupleurs 2 x 2. On peut l'utiliser comme élément constitutif d'un système plus développé, appelé système en série, illustré à la figure 47.

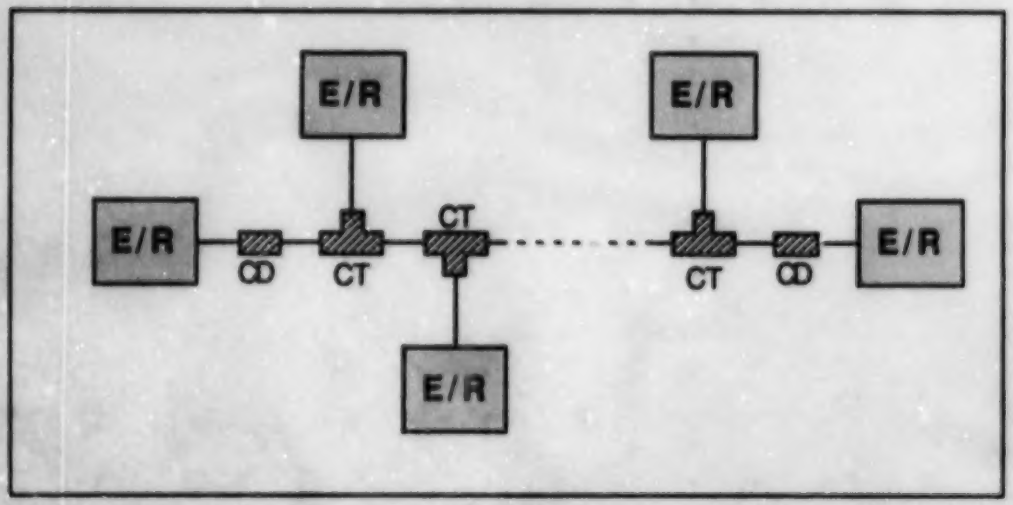


Figure 47

Système optique de distribution des données en série. — E/R: module émetteur-récepteur; CD: coupleur directionnel; CT: coupleur en T.

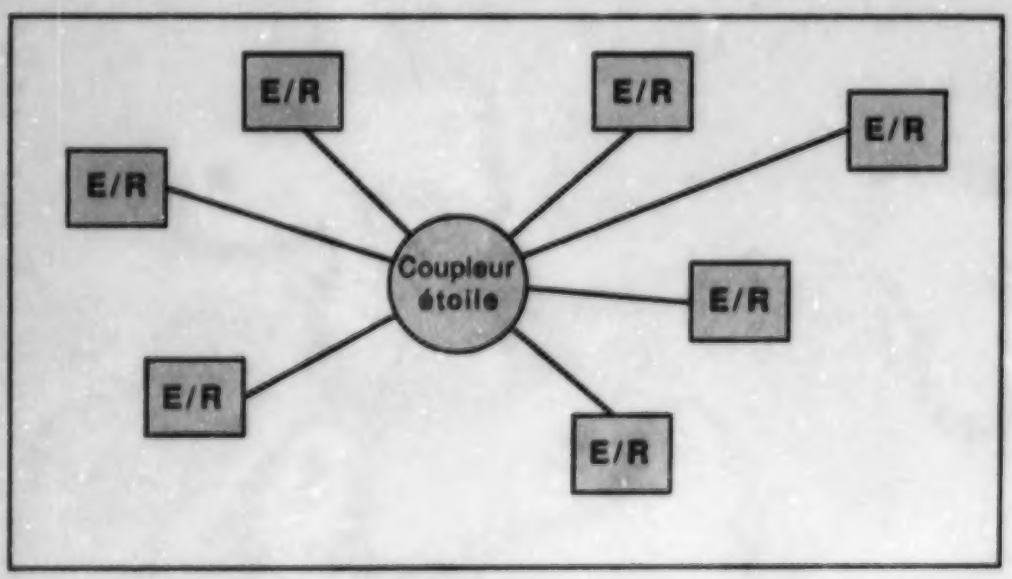


Figure 48

Système optique de distribution de données en étoile

L'autre conf.guration principale, dite en étoile, est présentée à la figure 48. Elle peut, tout comme la configuration en T, être multipliée afin de construire un système spécifique plus compliqué, comme par exemple celui qui est présenté à la figure 49.

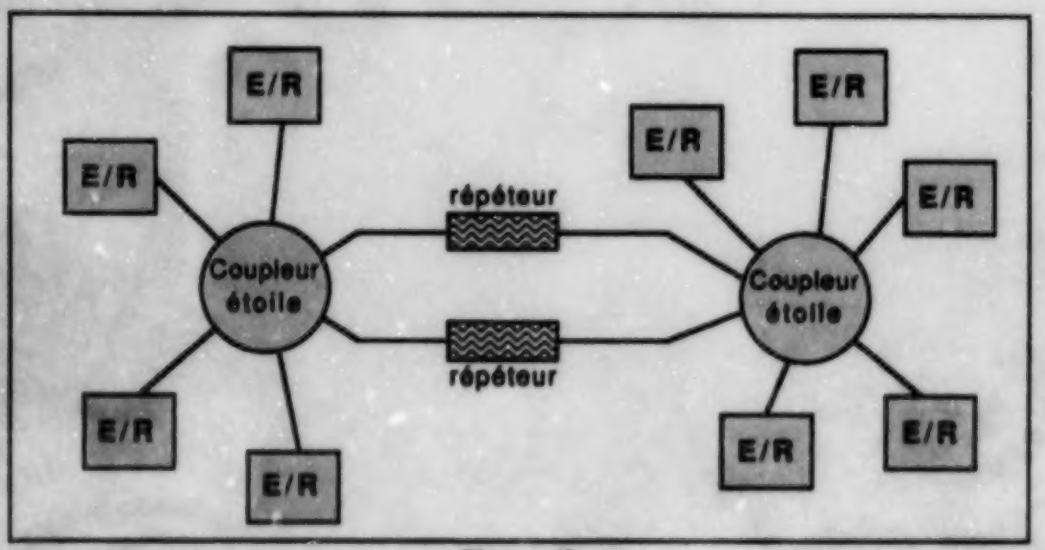


Figure 49

Système optique étoile-étoile pour la distribution à longue distance (avec répéteurs)

Outre les systèmes typiques, illustrés dans les figures 46 à 49, il est possible, dans certains cas, d'utiliser les systèmes dits hybrides qui sont composés d'éléments en série et/ou en étoile.

Un autre système, utilisé dans certaines applications militaires (pour guider les missiles à l'aide de fibres optiques par exemple) et appelé système multifibre (Multifiber Bundle Network), est présenté à la figure 50.

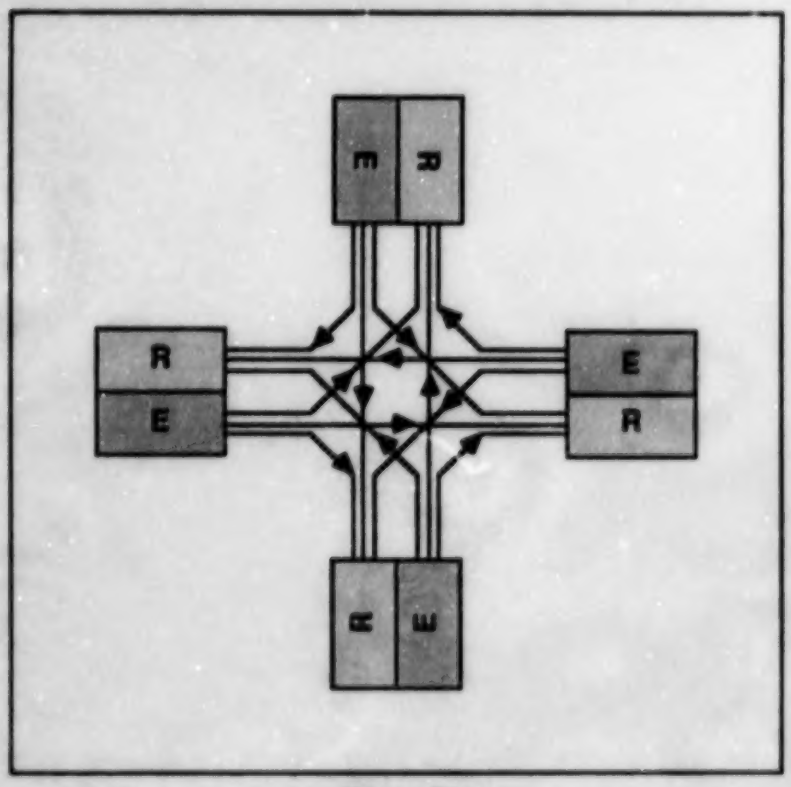


Figure 50

Système multifibre de communication optique

Chacun de ces systèmes de transmission a bien sûr ses propres caractéristiques ainsi que ses avantages et ses inconvénients. Le choix du système, comme par exemple celui qu'on utilise dans les réseaux locaux d'ordinateurs (figure 51), est toujours déterminé par les besoins concrets de l'utilisateur.

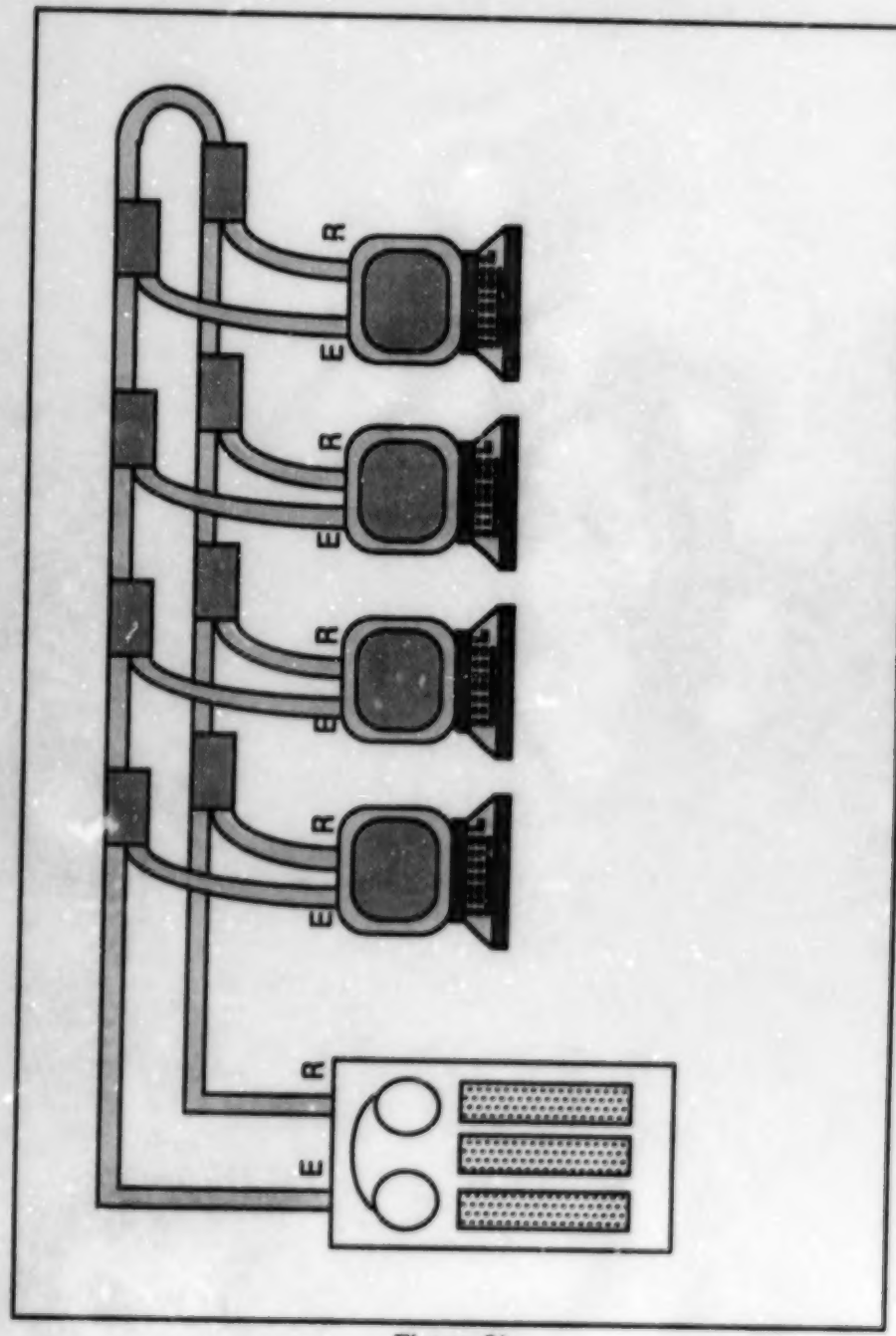


Figure 51

Système de transmission « bus» formant un réseau local d'ordinateurs

E: émetteur; R: récepteur

Chapitre XII
MULTIPLEXAGE

1. Généralités

Pour transmettre une information à l'aide de fibres optiques, il faut «l'imprimer» sur le faisceau optique. En général, il y a deux possibilités: on peut soit faire varier analogiquement l'intensité de la lumière en fonction des changements analogiques d'un signal de commande, soit, ce qui est habituellement préférable, encoder l'information sous la forme d'un signal numérique. On accorde aujourd'hui la préférence aux systèmes numériques, et ce, pour plusieurs raisons:

a) facilité de commutation rapide des diodes DEL et DL qui ont une bande passante large et qui sont très bien adaptées aux excellentes propriétés de transmission des fibres optiques;

b) évitement des distorsions non linéaires des caractéristiques puissance optique — l'intensité lumineuse émise par les diodes ne varie pas linéairement avec le courant électrique;

c) minimisation du taux d'erreurs de bits (BER - bit error rate);

d) compatibilité avec les systèmes électroniques;

e) facilité de resynchronisation et de recomposition des signaux optiques numériques à l'aide de répéteurs, si les signaux sont envoyés à grande distance.

La transmission numérique des signaux optiques est basée sur la conversion de signaux analogiques en un train encodé d'impulsions numériques. Les figures 52 et 53 montrent comment une suite d'impulsions peut être porteuse d'information analogique. La figure 52 illustre la modulation des impulsions en position (PPM - pulse position modulation) et en durée (PDM - pulse duration modulation), tandis que la figure 53 présente les méthodes de modulation de la fréquence porteuse OOK (On-Off keying), FSK (frequency-shift keying) et PSK (phase shift keying).

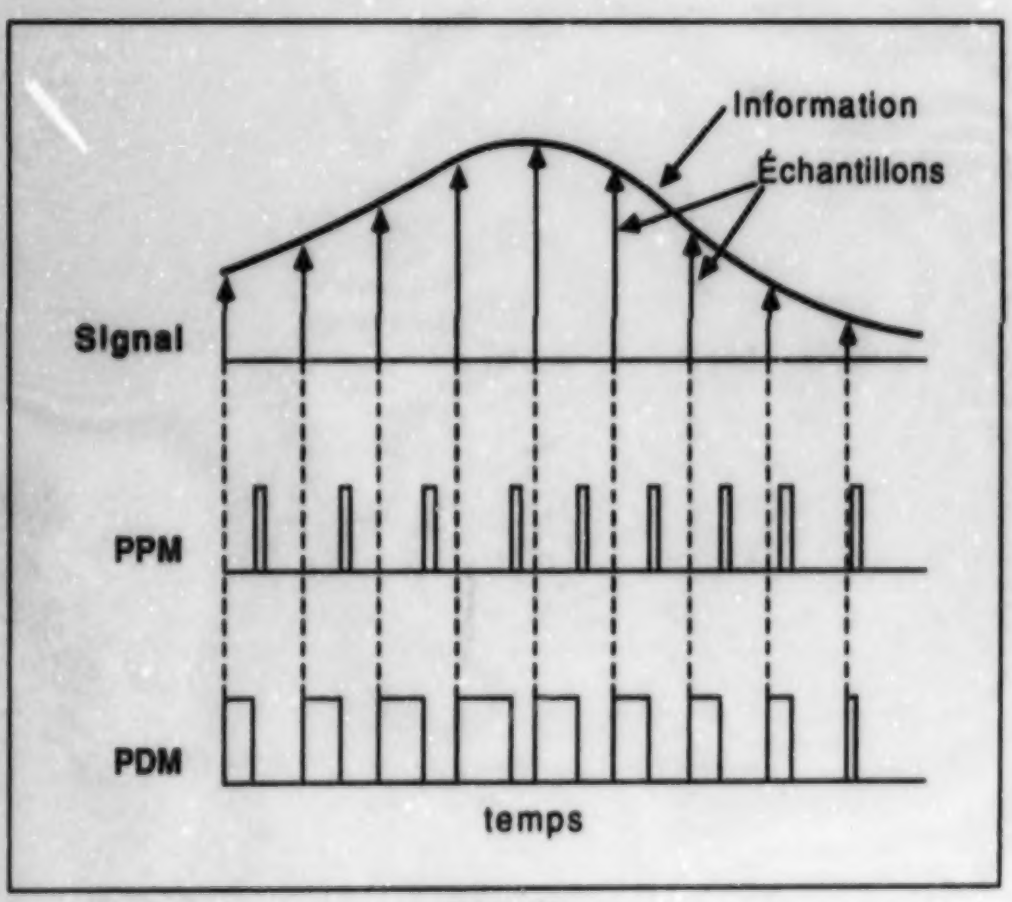


Figure 52

Modulation des impulsions en position (PPM) et en durée (PDM)

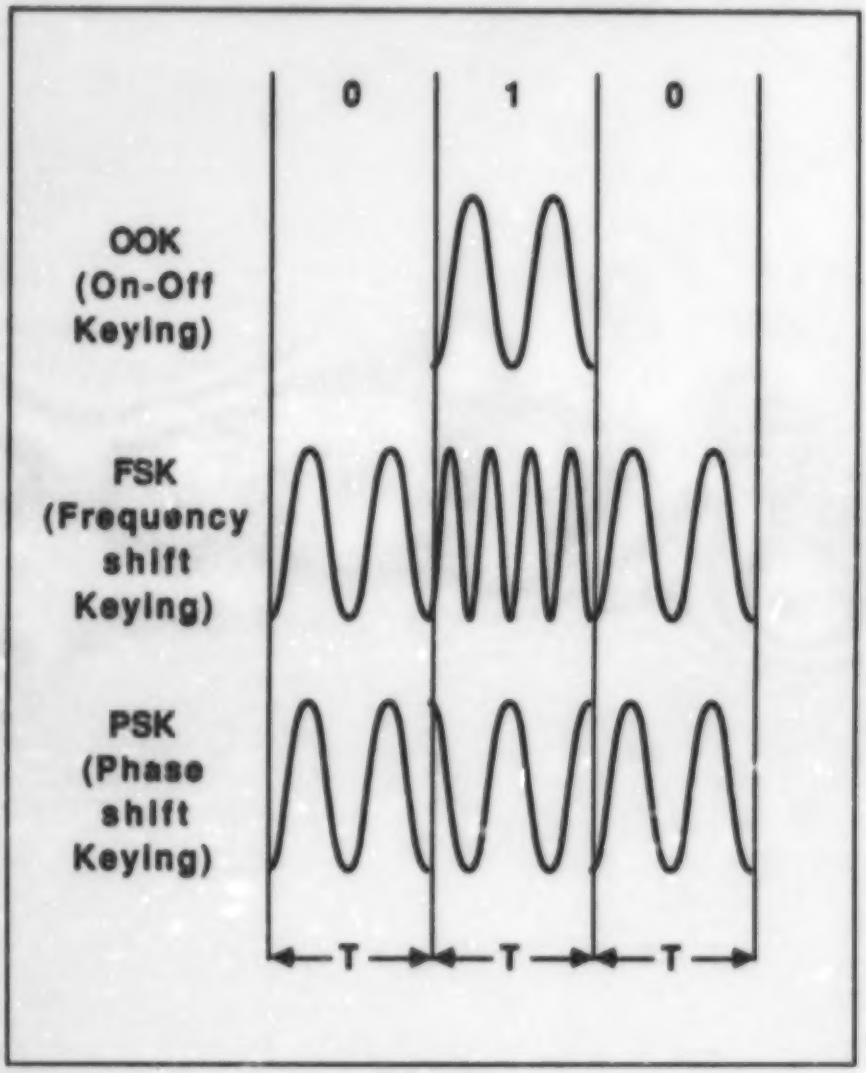


Figure 53

Méthodes de modulation de la fréquence porteuse

2. Multiplexage temporel

Pour réaliser le multiplexage temporel, on utilise la propriété qu'ont les fibres optiques de retarder le signal d'une durée proportionnelle à leur longueur. Ce délai est de l'ordre d'environ 5ns par mètre de fibre. Le multiplexeur numérique reçoit des

signaux provenant de plusieurs voies à basse vitesse et transmet les éléments binaires (bits) sous forme d'un train numérique synchrone à haute vitesse, en attribuant un intervalle de temps à chaque bit.

Le principe de fonctionnement d'un tel multiplexeur est illustré à la figure 54. Quatre signaux binaires à 2 Mbit/s modulent chacun leur émetteur optique. Quatre faisceaux de lumière sont ensuite véhiculés dans des fibres de longueur respective de L, L+ 25 m, L + 50 m et L + 75 m, ce qui entraîne un décalage temporel de 125 ns entre chaque ligne. Après avoir superposé ces signaux à l'aide d'un mélangeur optique, on obtient le multiplexage de quatre suites d'impulsions et un message à 8 Mbit/s qui peut ensuite être envoyé par une seule fibre optique. On voit facilement que l'information provenant de chacun des émetteurs est envoyée dans son propre canal temporel.

À l'intérieur d'un canal temporel, l'information est envoyée de manière indirecte (c'est-à-dire autrement que par simple PPM ou PDM), en utilisant des codes. Le codage a pour but d'insensibiliser le signal optique aux déformations de transmission. La figure 55 montre comment la même information peut être encodée selon différents codes de transmission.

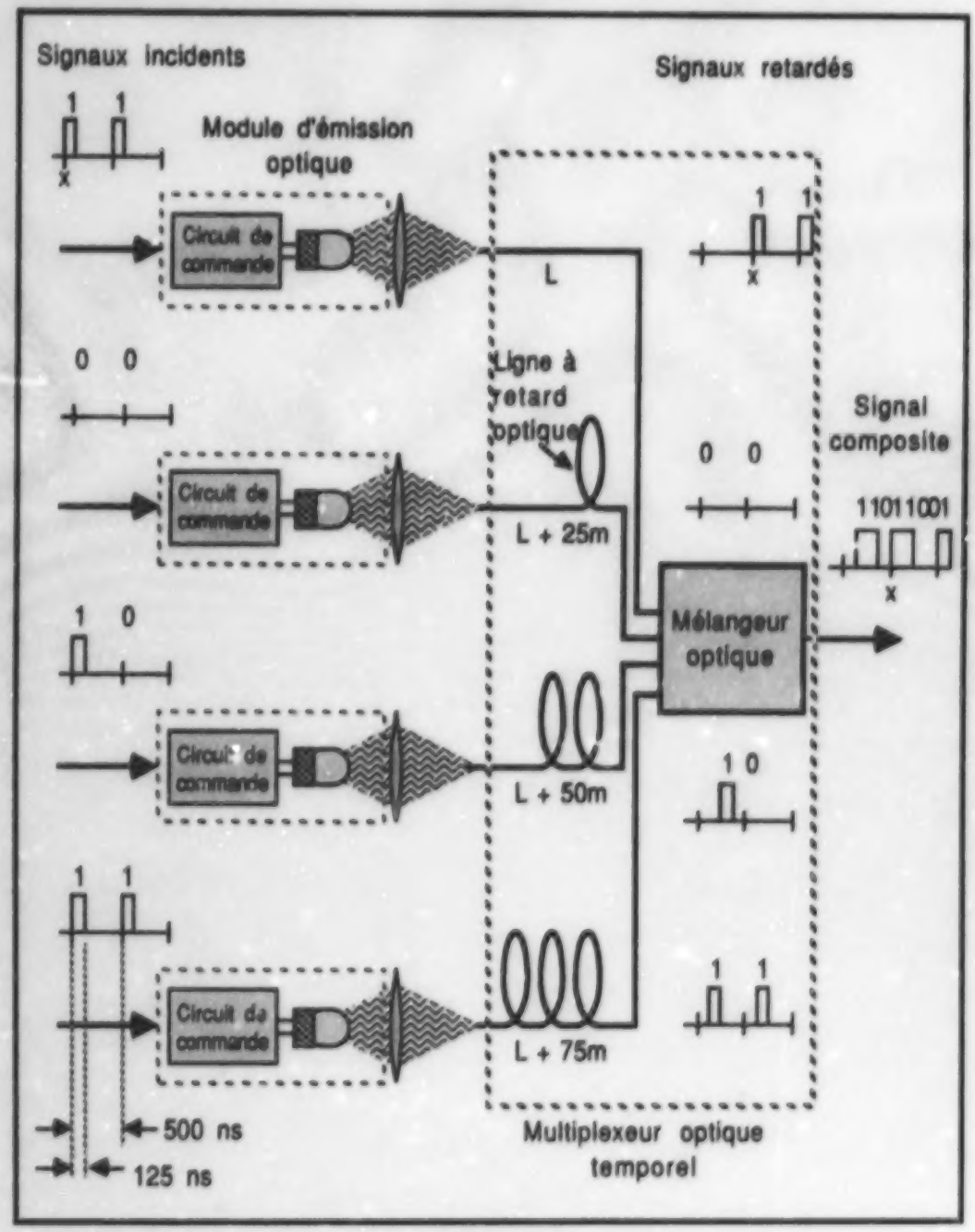


Figure 54

Multiplexeur optique temporel pour quatre voies

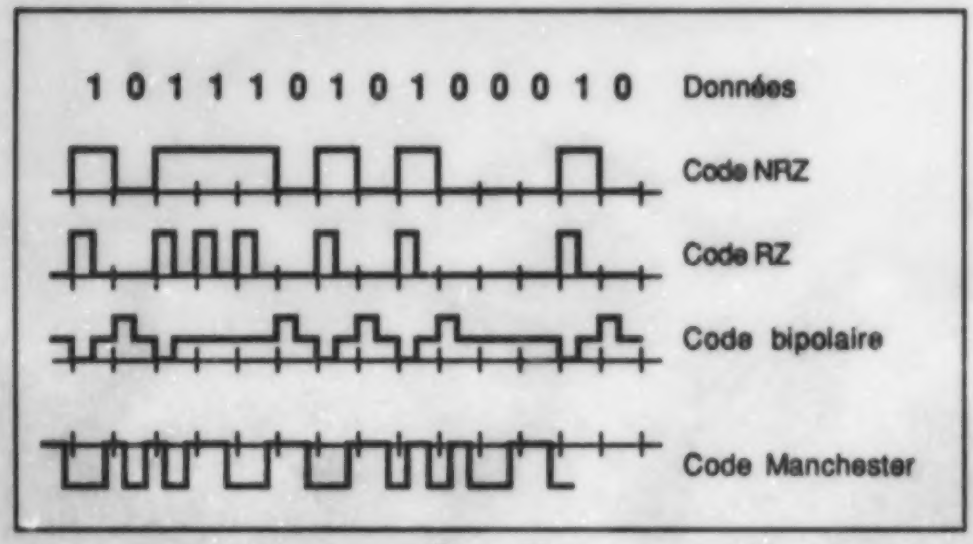


Figure 55

Codes de transmission de l'information à l'intérieur d'un canal temporel

3. Multiplexage en longueur d'onde

Pour véhiculer encore plus d'informations sur la même fibre, on peut y introduire plusieurs signaux optiques à des longueurs d'ondes différentes. Cela peut s'effectuer en utilisant le multiplexeur en longueur d'onde tel que représenté à la figure 56. Le multiplexeur optique réunit dans la même fibre des signaux lumineux en provenance de plusieurs émetteurs optiques (dans la pratique pas plus de 6), chacun ayant sa fréquence propre. Avant de pouvoir passer à la réception d'un tel signal il faut le démultiplexer, comme le montre aussi la figure 56. Les démultiplexeurs sont parfois des dispositifs réciproques, qui peuvent également multiplexer des signaux.

Le principe physique du multiplexage/démultiplexage, illustré à la figure 57, s'inspire des techniques d'analyse spectrale (spectroscopie) et nécessite l'utilisation d'éléments passifs, tels les réseaux de diffraction ou les prismes. La réponse de ces éléments prend la forme d'une déviation géométrique du faisceau lumineux en fonction de la longueur d'onde.

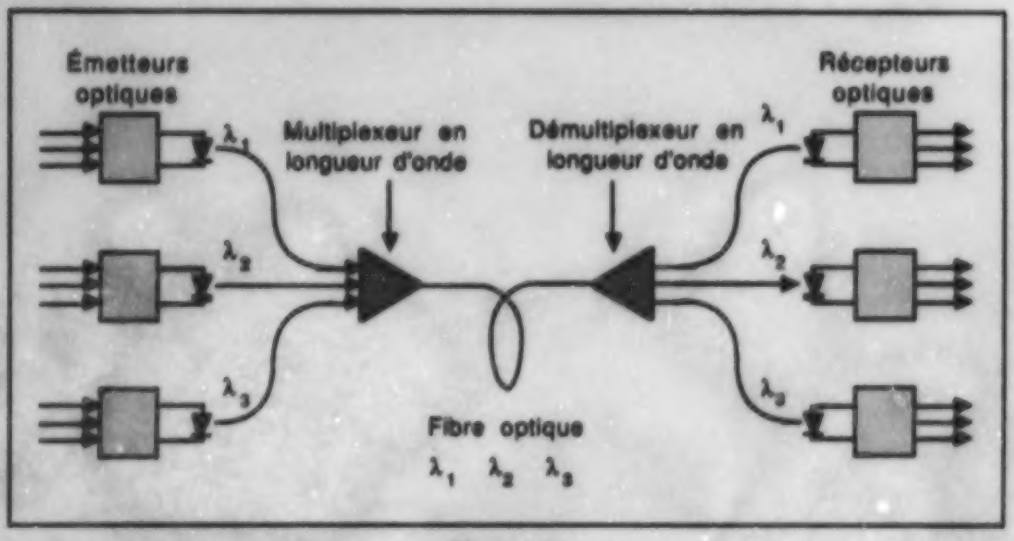


Figure 56

Multiplexage et démultiplexage en longueur d'onde

Les dernières recherches sur les systèmes de communication se concentrent maintenant sur les systèmes dits cohérents. Ceux-ci sont basés sur la modulation en fréquence (FM) des signaux sinusoïdaux et, dans l'avenir, ils seront probablement capables d'augmenter la distance parcourue entre les répéteurs, diminuant ainsi le coût de la transmission.

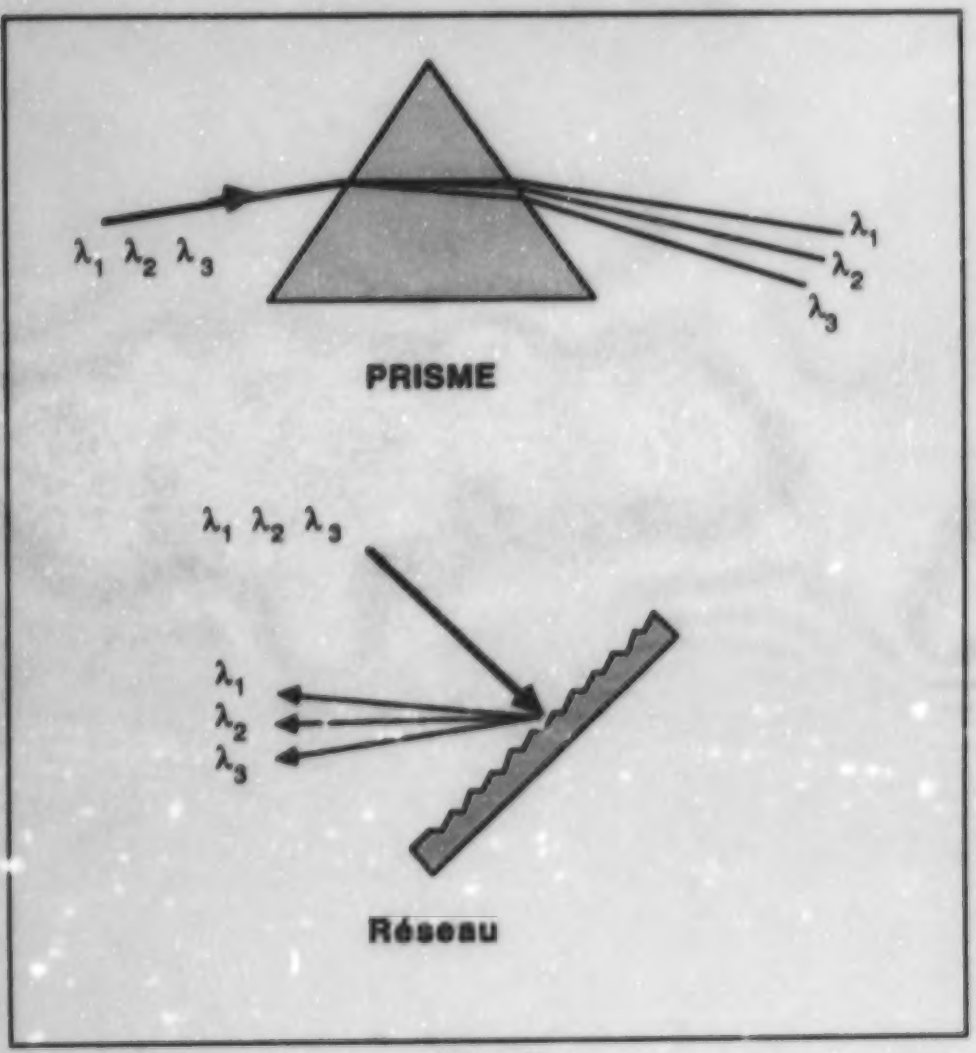


Figure 57

Principe physique du multiplexage et démultiplexage en longueur d'onde

BIBLIOGRAPHIE

1. A. Cozannet, J. Fleuret, H. Maitre, M. Rousseau, «Optique et télécommunications», Éditions Eyrolles, Paris (1983).

2. P. K. Cheo, «Fiber Optics - Devices and Systems», Prentice - Hall, Englewood Cliffs (1985).

3. A. Yariv, «Optical Electronics», CBS College Publishing, New York (1985).

4. H. A. Elion, V. N. Morozov, «Optoelectronic Switching Systems in Telecommunications and Computers», Marcel Dekker, New York (1984).

5. G. Cancellieri, U. Ravaioli, «Measurements of Optical Fibers and Devices: Theory and Experiments», Artech House, Dedham (1984).

6. W. T. Boyd, «Fiber Optics», Howard W. Sams, Indianapolis (1986).

Niveau(x) d'enseignement: 7 Numéro EDUQ : 8970265
Centre d'intérêt: 874

Bock, Wojtek J.

Laboratoire d'optoélectronique. Cahiers d'expériences / [Wojtek J. Bock]. -- [Hull] : Université du Québec à Hull, c1989.
125 f. en foliotation multiple : ill. ; 28 cm + guide pédagogique (99 f. : ill.).

En tête du titre: Programme Recherche-développement pour les formateurs.
Bibliogr.: Guide pédagogique, f. 99.

Vedette(s)-secondaire(s): Université du Québec à Hull

Descripteur(s): Techniques physiques • Cahier d'exercices • Guide pédagogique • Manuel scolaire • Collégial (Ordre d'enseignement)

Identificateur(s) de sujet: Electrotechnique • Optique des fibres • Optoélectronique

Ce cahier comprend dix expériences sur les systèmes de communication par fibres optiques. Chaque expérience à réaliser est précédée d'un exposé sur la théorie qu'elle implique. Les expériences sont groupées sous trois thèmes: notions scientifiques de base, fonctionnement des dispositifs optoélectroniques et applications pratiques. Le "guide pédagogique" qui accompagne le cahier d'expériences peut être considéré comme un exposé théorique sur l'optique des fibres.

Type de document: r
Notice(s) connexe(s): 8970013

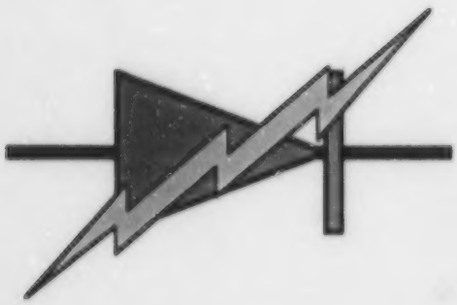
LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE

Universite
du Quebec a Hull

Wojtek J. Bock

Cahiers d'expériences

Programme RECHERCHE-DÉVELOPPEMENT POUR LES FORMATEURS



LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE

Cette recherche a été réalisée grâce à une subvention accordée par le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Science du Québec.

Fruit d'un travail collectif, cet ouvrage a bénéficié en particulier du concours des chercheurs de l'Université du Québec à Hull, des enseignants de la polyvalente Mont-Bleu et de la société Bell-Northern Research.

À tous ceux qui ont collaboré à l'élaboration et à la réalisation de ce projet, l'auteur tient ici à exprimer ses sincères remerciements et plus particulièrement aux personnes suivantes:

Mario Beaulieu (UQAH)
Jean-Marc Deslauriers (polyvalente Mont-Bleu)
Lucjan Grochowski (UQAH)
Janguy Perry (UQAH)
Marek Wernik (BNR)

Copyright © 1989 Wojtek J. Bock

LISTE DES EXPÉRIENCES

Centre I – Notions scientifiques de base

Expérience 1: Mesure des paramètres caractéristiques des fibres optiques

Expérience 2: Caractérisation des sources de lumière

Expérience 3: Caractérisation des détecteurs optiques

Expérience 4: Caractéristiques spectrales des systèmes de transmission

Centre II – Fonctionnement des dispositifs optoélectroniques

Expérience 5: Systèmes de couplage de la lumière

Expérience 6: Étude des signaux optiques à intensité variable (modulation mécanique)

Expérience 7: Modulation acousto-optique de la lumière

Expérience 8: Les épissures fixes

Centre III – Applications pratiques - systèmes de dispositifs

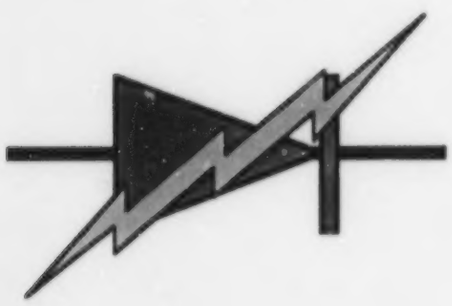
Expérience 9: Système numérique de transmission des signaux optiques infrarouges

Expérience 10: Simulation de la modulation numérique de la lumière visible

Démonstration 1: Liaison téléphonique duplex

Démonstration 2: Interféromètre Mach-Zender

LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE



Centre I

Expérience I

Mesure des paramètres caractéristiques des fibres optiques

MESURE DES PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES DES FIBRES OPTIQUES

Objectifs:

1. Apprentissage des techniques de mesure des principaux paramètres caractérisant les fibres optiques
2. Mesure de l'ouverture numérique et de la puissance des signaux optiques guidés dans les fibres.

Matériel:

1. Source de la lumière - laser He-Ne
2. Fibres multimodes et fibres monomodes
3. Photodétecteur
4. Appareil de mesure de la puissance optique
5. Manipulateur x-y-z
6. Banc d'optique
7. Équipement de positionnement

INTRODUCTION

1. Ouverture numérique

L'ouverture numérique est un des paramètres les plus importants des fibres optiques. Elle est définie comme la mesure de quantité maximale de lumière acceptable pour un système optique donné. Ce paramètre doit être connu pour assurer un couplage optimal entre la fibre optique et la source de la lumière (ou le détecteur). En fin de compte, le choix définitif de la fibre pour un système donné s'effectue en visant un compromis entre la nécessité d'avoir une bande passante élevée et le besoin d'un angle d'acceptance assez grand.

La notion d'ouverture numérique peut être expliquée géométriquement par la figure 1. On y voit une fibre optique à saut d'indice, constituée d'une partie centrale (le coeur) entourée d'une gaine optique dont l'indice de réfraction est inférieur à celui du coeur. Le guidage de la lumière à l'intérieur du coeur est donc assuré par la réflexion totale et le trajet lumineux est alors un trajet en zig-zag. La figure 1 montre aussi que seuls les rayons incidents à l'intérieur du cône d'acceptance (caractérisé par l'angle θ) peuvent effectivement entrer dans la fibre optique. Si l'angle d'incidence dépasse ce cône ($\theta > \theta_c$), le rayon entre dans la gaine et sort à l'extérieur de la fibre.

Le phénomène de la réflexion totale peut être expliqué par les lois de Snell. Dans la figure 2, on voit une série de rayons incidents qui s'approchent de l'interface entre deux matériaux optiques du côté de celui qui est caractérisé par le coefficient de réfraction supérieur. Selon les lois de Snell:

$$n_t \sin(\theta_t) = n_i \sin \theta_i \qquad (n_i > n_t)$$

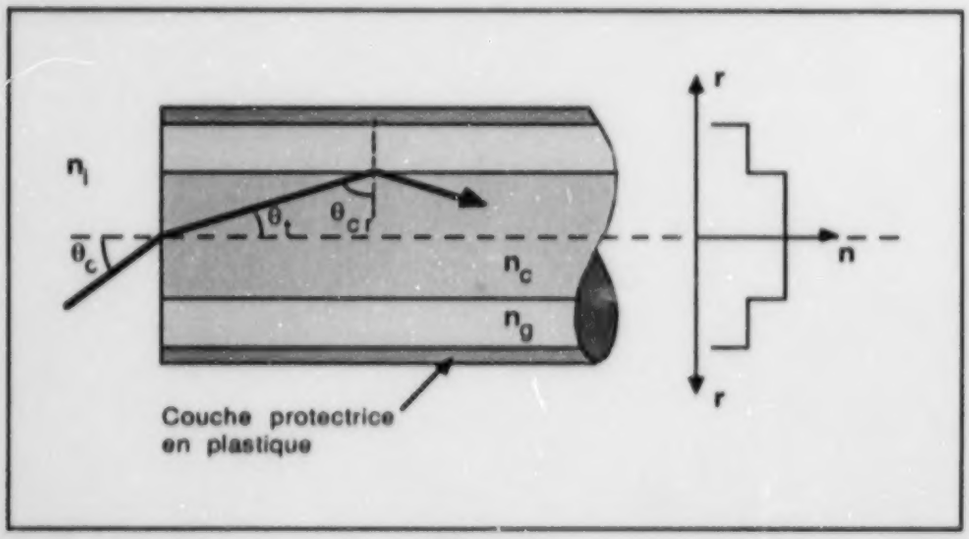


Figure 1

Propagation d'un rayon dans une fibre à échelon d'indice — n_0 = indice de réfraction du milieu à l'extérieur de la fibre; n_c = indice de réfraction du coeur; n_g = indice de réfraction de la gaine; θ_{cr} = angle critique de réflexion complète dans la fibre; θ_c = angle d'injection de la lumière donnant l'angle θ_{cr} dans la fibre; θ_t = angle réfracté.

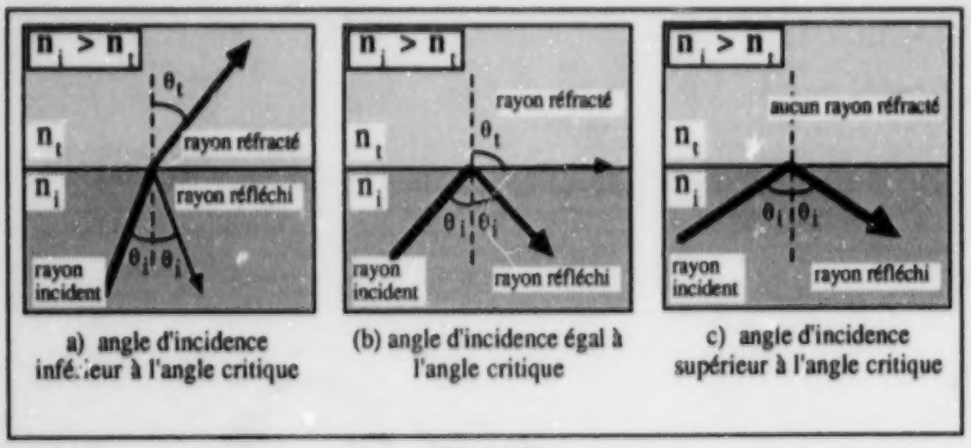


Figure 2

Série de rayons incidents

n_i = indice de réfraction du matériau situé du côté du rayon incident;

n_t = indice de réfraction du matériau transmis de l'autre côté de l'interface.

L'angle du rayon réfracté sera toujours supérieur à l'angle d'incidence.

$$\theta_t > \theta_i$$

À un angle donné, il n'y aura pas de rayons réfractés, car toute la puissance optique va se propager parallèlement à l'interface ou bien sera réfléchie à l'intérieur du milieu optiquement plus dense. Une réflexion totale interne se produit alors. L'angle qui en découle est appelé "angle critique". Il est donné par l'équation suivante:

$$n_t \sin \theta_t = n_t \sin 90^\circ = n_i \sin \theta_{cr}$$

$$\sin \theta_{cr} = n_t / n_i$$

En associant le premier milieu, optiquement plus dense, au coeur d'une fibre caractérisé par un indice de réfraction n_c (n_i devient n_c), et le second milieu à une gaine possédant un indice de réfraction n_g (n_r devient n_g), on peut calculer le cône d'acceptance de la fibre comme suit:

$$\begin{aligned} n_o \sin \theta_c &= n_c \sin \theta_t = n_c \sin (90 - \theta_{cr}) \\ &= n_c \cos \theta_{cr} \\ &= n_c \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{cr}} \end{aligned}$$

mais $\sin \theta_{cr} = n_g / n_c$, alors:

$$n_o \sin \theta_c = n_c \sqrt{1 - (n_g^2 / n_c^2)} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

L'ouverture numérique est alors définie par l'angle θ_c. Dans la plupart des cas, le rayon est injecté à partir d'un milieu initial composé d'air, donc $n_o = 1$. L'ouverture numérique peut être finalement exprimée comme suit:

$$NA = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

Il est parfois commode d'exprimer l'ouverture numérique directement en fonction de n_o et θ_o:

$$NA = n_o \sin \theta_c = \sin \theta_c \qquad \text{(dans l'air).}$$

Les fibres monomodes sont caractérisées par une ouverture numérique NA = 0,1; tandis que les fibres multimodes ont des valeurs de NA comprises entre 0,3 et 0,6.

2. Puissance des signaux optiques guidés

Il est essentiel de pouvoir mesurer la puissance des signaux véhiculés à l'intérieur des fibres optiques. Une telle information peut servir par exemple à déterminer si le signal est effectivement entré dans la fibre et si la ligne de transmission optique fonctionne. On peut l'utiliser aussi pour déterminer plusieurs paramètres caractéristiques de la fibre tels que l'atténuation et l'ouverture numérique. Si on peut mesurer une puissance optique avant et après un connecteur, la comparaison des résultats de ces mesures va permettre de déterminer les pertes de connexion. Ces pertes seraient dues au mésalignement, tel qu'illustré par la figure 3.

La mesure de la puissance peut être absolue (en Watt) ou relative (en dB), tel que défini par l'équation suivante:

$$\alpha = 10 \log (P_2/P_1)$$

où P_1 est la puissance de référence

P_2 est la puissance mesurée

Il est clair que lorsque $P_2<P_1$ on a un cas d'atténuation du signal, tandis que $P_2>P_1$ correspondra à son amplification.

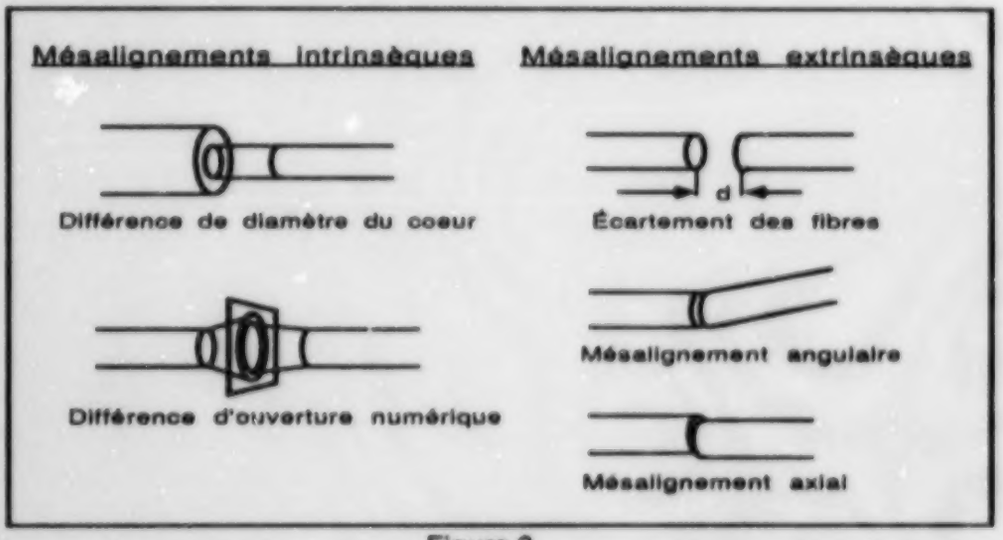


Figure 3

Exemples de mésalignements dans des épissures causant des pertes de puissance

Dans l'élaboration d'un système optique de communication, le bilan des pertes doit être dressé avec soin. Ce calcul peut s'effectuer facilement en utilisant la notation de la puissance relative exprimée en décibels. L'atténuation totale du système sera alors donnée par la somme des atténuations causées par chaque composante. Mais attention: le calcul effectué ainsi ne sera valide que si toutes les valeurs d'atténuations sont exprimées en décibels (voir figure 4).

$$\alpha_T = 10 \log (P_n/P_1)$$

$$= 10 \log (P_2/P_1) + 10 \log (P_3/P_2) + \ \ldots \ + 10 \log (P_{n-1}/P_n)$$

$$= \alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_n$$

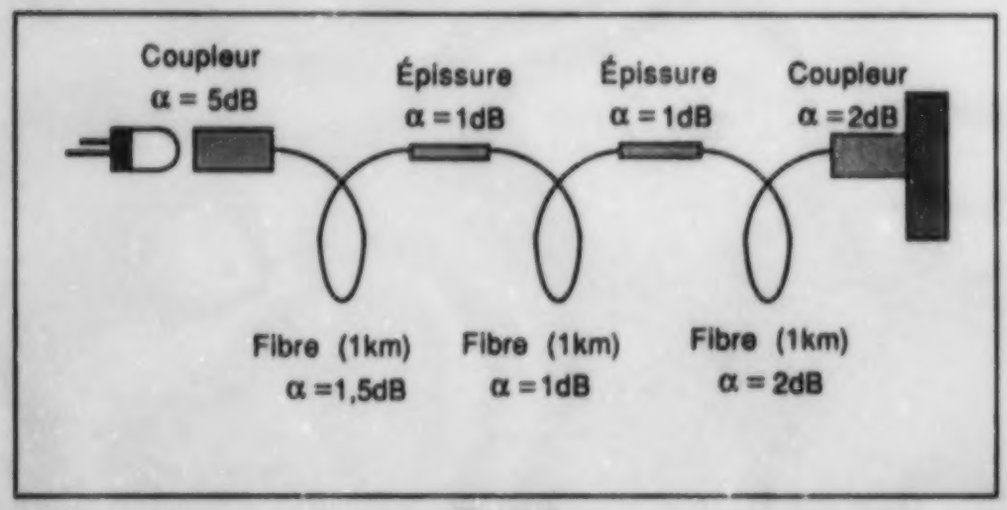


Figure 4

Exemple pour le calcul de l'atténuation totale causée par un système. L'atténuation de ce système est de 13,5 dB, c'est-à-dire une puissance de sortie égale à 0,045 P_0

Le concepteur du système de communication peut facilement comparer la puissance dont il dispose (sous forme d'une diode DEL ou DL) avec toutes les sources de pertes dans le système afin de déterminer si le système projeté est réalisable. Connaissant la puissance disponible à l'émission ainsi que l'atténuation totale du système, on obtiendra la puissance à la sortie par l'équation suivante:

$$dB = 10 \log_{10}(P_2/P_1)$$

$$dB/10 = \log_{10}(P_2/P_1)$$

$$10^{dB/10} = P_2/P_1$$

$$P_2 = P_1 \cdot 10^{dB/10} \qquad (P_1 \text{ et } P_2 \text{ sont en W})$$

Par exemple, si un dispositif D entraîne les pertes de 10dB:

pour calculer la puissance finale, on utilisera -10dB, le signe "-" indiquant une perte. La puissance à la sortie sera:

$$P_2 = P_1 \cdot 10^{0,1 \cdot (-10)}$$
$$= P_1 \cdot 10^{-1}$$
$$= 0,1\ P_1$$

Une perte de 10 dB correspond donc à une puissance sortante égale à 1/10 de la puissance à l'entrée du dispositif. Une perte de 3 dB correspondrait quant à elle à une puissance de sortie égale à $10^{-0,3}$ fois la puissance initiale ($\approx 0,501\ P_1$), soit environ la moitié de ladite puissance.

Quand la lumière est véhiculée à l'intérieur d'une fibre optique, la portion d'énergie lumineuse qui arrive à la sortie décroît à cause de l'atténuation. Plus la longueur de la fibre augmente, plus l'atténuation globale augmente. Pour cette raison, l'atténuation (considérée comme un paramètre de la fibre) est normalement exprimée en dB par unité de distance, soit en dB/m ou en dB/km. Les valeurs typiques de l'atténuation des fibres présentement disponibles sur le marché varient entre 10 dB/km et 0,5 dB/km, les meilleures ayant une atténuation de 0,35 dB/km et 0,21 dB/km pour des longueurs d'ondes respectives de 1,3 µm et 1,55 µm.

EXPÉRIENCE

1. L'OUVERTURE NUMÉRIQUE

1. Faites le montage du système de mesure selon la figure 5.

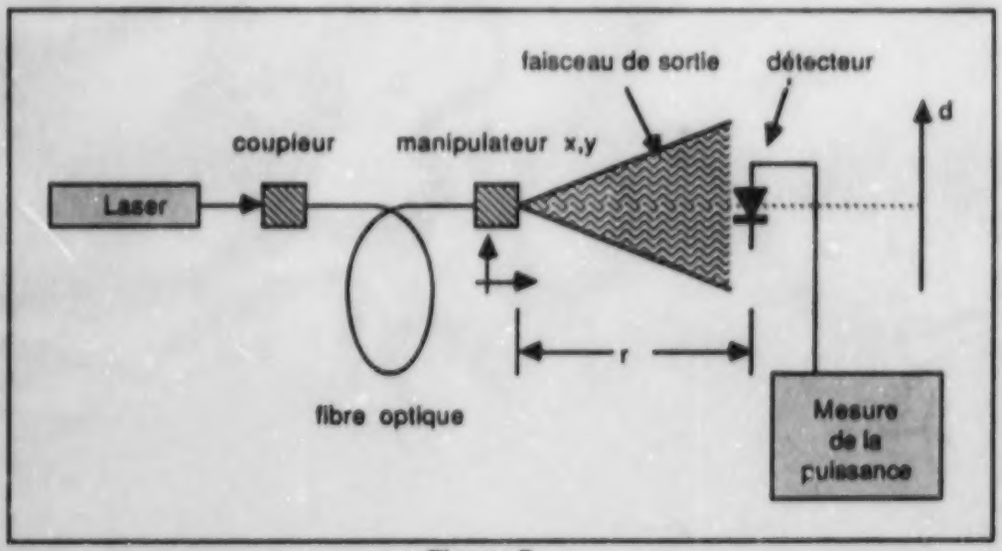


Figure 5

Montage du système expérimental pour la mesure de l'ouverture numérique des fibres optiques

2. Montez le détecteur sur le manipulateur x - y - z.

3. Réglez le coupleur pour maximiser la quantité de la lumière injectée dans la fibre.

4. Ajustez la position du détecteur pour obtenir l'indication maximale "I_o" sur l'appareil de mesure de la puissance et notez cette valeur.

5. Mesurez et notez la distance "r" entre le photodétecteur et la fibre optique.

6. Notez l'indication "I" de l'appareil de mesure de la puissance pour 10 valeurs de "d".

7. En calculant l'angle selon l'équation

   $$\mathrm{tg}\ \theta = d/r$$

   calculez et tracez la dépendance d'intensité relative I/I_0 en fonction de θ.

8. Répétez les mesures en utilisant des fibres différentes (multimodes et monomodes).

9. Trouvez θ_c à partir du graphique et, en posant $n_o = 1$, calculez NA pour chacune des fibres.

Fibre: _____
Valeur de r: _____ mm
Valeur de I_o _____

d	I	θ	I/I_o

Fibre: _____
Valeur de r: _____ mm
Valeur de I_o _____

d	I	θ	I/I_o

Tableaux des résultats

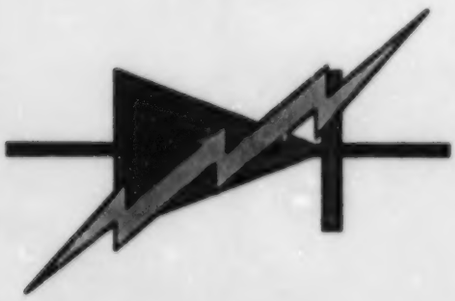
2. MESURE DE LA PUISSANCE DES SIGNAUX OPTIQUES GUIDÉS PAR LES FIBRES

1. Faites le montage du système de mesure selon le diagramme présenté sur la figure 5.
2. Mesurez et notez la puissance à la sortie de la fibre homogène de 11 m.
3. Mesurez et notez la puissance à la sortie de la fibre composée (celle constituée de 11 sections de fibre jointes à l'aide de 10 épissures fixes).
4. Calculez la perte de couplage en dB en utilisant les données obtenues aux étapes 2 et 3.
5. Calculez la perte moyenne introduite par une épissure fixe en utilisant les résultats des calculs précédents.
6. Observez l'influence de pertes de macrocourbures en courbant la fibre avec les doigts.

Questionnaire

1. Quelle ouverture numérique, soit $NA_1 = 0,1$ ou $NA_2 = 0,6$ rend plus facile l'introduction de la lumière dans une fibre optique? Pourquoi?
2. Est-ce que la lumière peut être guidée par une fibre dont les coefficients de réfraction du coeur et de la gaine sont égaux?
3. Calculez l'atténuation totale d'une ligne de transmission optique, lorsque les atténuations des éléments constitutifs sont $\alpha_1 = -4$ dB, $\alpha_2 = -2$ dB, $\alpha_3 = -8$ dB. Donnez le résultat en dB et ainsi que sous la forme d'une fraction de la puissance initiale.

LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE



Centre I

Expérience 2

Caractérisation des sources de lumière

CARACTÉRISATION DES SOURCES DE LUMIÈRE

Objectifs:

1. Apprentissage des principes de fonctionnement des différentes sources de lumière
2. Mesure des caractéristiques de la diode électroluminescente et de la diode laser.

Matériel:

1. Plaquette d'expérimentation sur les sources de lumière (DEL)
2. Ensemble d'expérimentation sur les sources de lumière (DL)
3. Alimentation électrique 5V d.c.
4. Appareil de mesure de la puissance optique
5. Ampèremètre
6. Voltmètre

INTRODUCTION

Ce laboratoire vous permettra d'étudier le fonctionnement des diodes électroluminescentes (DEL) ainsi que des diodes laser (DL). Ce sont les sources de lumière les plus utilisées dans le domaine de l'optoélectronique. Mais avant d'entreprendre l'étude de ces deux composants, on examinera de plus près ce qu'est la lumière et comment elle est émise par des sources « ordinaires » telles que l'ampoule incandescente et le tube à décharge.

1. La lumière

La lumière c'est de l'énergie, sous la forme d'un rayonnement électromagnétique, qui est percevable par notre œil. Mais le rayonnement électromagnétique, c'est plus que la lumière visible. Il y a aussi les rayons infrarouges que l'on ressent lorsqu'on est près d'un objet très chaud; le rayonnement gamma (γ) qui est émis lors de certaines désintégrations nucléaires; les micro-ondes et bien d'autres. La figure 1 présente un schéma du spectre électromagnétique indiquant le nom donné à chaque région. On peut remarquer sur ce schéma que certaines régions du spectre ont une double appellation. Par exemple, la plage s'étendant de 10^{-12}m à 10^{-10}m correspond à une partie des rayons gamma et à une partie des rayons X. De même, on voit que la chaleur fait partie des infrarouges et que les ondes UHF occupent une partie du spectre réservée aux micro-ondes.

La physique nous apprend que, pour la matière comme pour l'énergie, rien ne se perd et rien ne se crée. En se refroidissant, un solide très chaud transmettra une partie de son énergie à l'air ambiant en excitant les molécules d'air qui le frappent et une autre partie se retrouvera sous la forme de rayonnements électromagnétiques. Plus le solide est chaud, plus le rayonnement qu'il émettra sera de fréquence élevée. Le solide porté à quelques centaines de degrés Celcius émettra une radiation composée principalement de rayons infrarouges. Porté à plus de 1000°C, ce même solide commencera à émettre une radiation visible, rouge au début, puis de plus en plus blanche à mesure que sa température augmente.

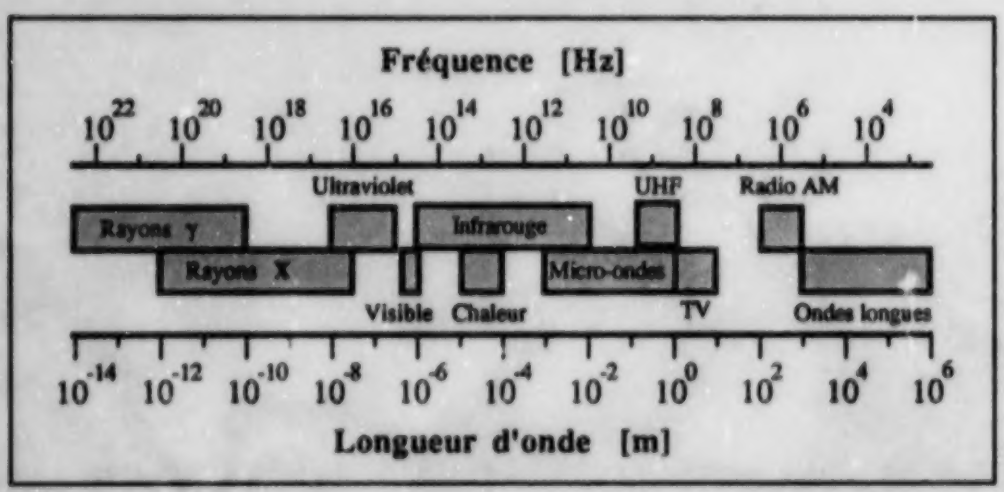


Figure 1

Spectre des ondes électromagnétiques

Le rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire la lumière, se propage à une vitesse connue sous le nom de « vitesse de la lumière » et qui est habituellement représentée par la lettre « c ». Cette vitesse est d'environ 300000 km/s ($3 \cdot 10^8$ m/s). Il s'agit là de la vitesse limite dans l'univers. Rien ne peut dépasser cette vitesse. La lumière est souvent caractérisée par sa *longueur d'onde* plutôt que par sa fréquence. La relation suivante relie la longueur d'onde de la lumière à sa fréquence:

$$\lambda = c / \nu$$

où λ est la longueur d'onde de la lumière,
c est la vitesse de la lumière ($\approx 3 \times 10^8$ m/s)
ν est la fréquence.

2. Les sources de lumière

2.1 L'ampoule incandescente

Il existe plusieurs façons de produire de la lumière à partir d'un courant électrique. On peut par exemple chauffer un filament métallique placé dans une ampoule sous vide. Une partie de l'énergie calorifique du filament est transformée en ondes électromagnétiques (i.e. en photons) qui sont alors perçus par notre œil sous forme de lumière et par notre peau en tant que chaleur. C'est le principe de l'ampoule incandescente que l'on retrouve dans toutes les maisons et qui produit un rayonnement dont le spectre est continu. La température de ce filament étant relativement basse (moins de 2000°C), la couleur de la lumière émise tire légèrement sur le jaune. En ajoutant un gaz halogène dans l'ampoule, on pourra augmenter le courant circulant dans le filament sans qu'il se brise et ainsi élever sa température à près de 3000°C. La lumière émise est alors plus blanche et d'une intensité plus grande pour une même puissance électrique. On est alors en présence d'une ampoule « halogène ». D'autres sources utilisent le principe d'un arc électrique se propageant dans un gaz. C'est le cas des fluorescents qu'on verra un peu plus loin.

2.2 Le tube à décharge

Les néons et les tubes fluorescents entrent dans cette catégorie. Les lignes qui suivent expliquent comment la lumière est émise par ces sources. Les atomes possèdent des niveaux d'énergie discrets. Cela signifie que les électrons liés à un atome sont contraints de demeurer sur des niveaux d'énergie précis (voir figure 2). Les seules énergies permises pour un électron excité sont celles qui correspondent aux niveaux d'énergie de l'atome, tel que représenté sur la figure 2. Lorsqu'un électron situé dans un niveau d'énergie élevée saute sur un autre niveau d'énergie plus basse, il se produit l'émission d'un photon, c'est-à-dire d'un « *grain de lumière* ». L'énergie de ce photon est égale à la différence d'énergie entre les deux niveaux impliqués. La longueur d'onde du photon est reliée à son énergie par la relation suivante:

$$\lambda = h c / E$$

où λ est la longueur d'onde du photon (en m)
h est la constante de Planck (= 4.134 x 10^{-15} eV·s)
c est la vitesse de la lumière (= 3 x 10^{8} m/s)
E est l'énergie du photon (égale à la différence d'énergie entre les 2 niveaux)

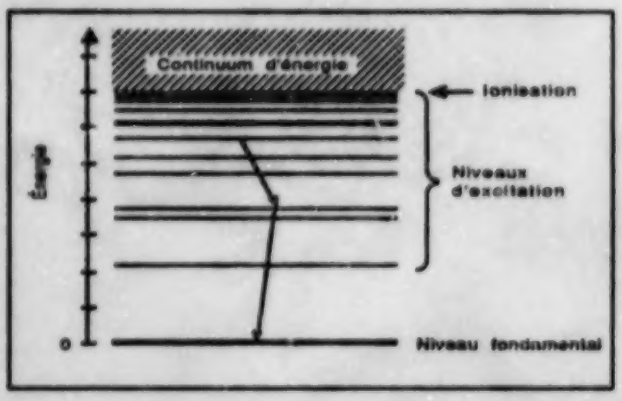


Figure 2

Niveaux d'énergie dans un atome isolé. Les transitions d'un niveau supérieur à un niveau d'énergie moindre provoque l'émission d'un photon.

L'existence de niveaux d'énergie discrets fait que le nombre de transitions différentes impliquant un atome est fini. Le spectre de la lumière émise par un gaz sera donc composée d'une série de raies fines, chaque raie étant associée à un couple de niveaux. C'est le cas du tube au néon où la lumière est émise par un arc dans un tube à pression réduite contenant de du néon. Le spectre émis par ces lampes est composé de raies discrètes. La lumière est émise lorsque les électrons passent d'un état quantique d'énergie élevée à un autre dont l'énergie est plus faible. Le tube au néon apparaît rouge parce que les raies principales que ce gaz émet ont une énergie correspondant à la partie rouge du spectre visible.

2.3 Les dispositifs à semiconducteurs

Dans le domaine de l'optoélectronique, deux sources sont le plus communément utilisées. Ce sont les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes laser (DL). Plusieurs caractéristiques justifient leur usage généralisé:

- modulables directement jusqu'à de très hautes fréquences (>1 GHz pour les DL)
- utilisent peu de puissance, donc sont contrôlables avec des transistors ordinaires
- très compacts: peuvent être incorporés dans l'autres instruments
- possibilité de les coupler à une fibre optique (version « pigtail »)

Les sections suivantes décrivent le fonctionnement de ces dispositifs ainsi que leurs caractéristiques principales. Mais pour bien comprendre leur fonctionnement, quelques notions sur la théorie des semiconducteurs doivent d'abord être vues.

3. Les semiconducteurs

3.1 La structure de bandes

Lorsque les atomes sont réunis pour former un cristal, les interactions entre-eux provoquent un élargissement des niveaux d'énergie. Les niveaux se transforment alors en bandes d'énergie. Deux bandes présentent un intérêt particulier: la bande de valence et la bande de conduction. La première correspond aux couches électroniques superficielles de l'atome. Les électrons présents dans cette bande sont liés à l'atome par le potentiel électrique du noyau. La seconde bande, dite de conduction, recouvre la première et est partagée par tous les atomes du cristal. Les électrons présents dans cette bande pourront se déplacer dans le cristal. Il existe une zone d'énergie interdite entre la bande de valence et celle de conduction. On classe les solides selon la largeur de cette zone.

Conducteur: les bandes de valence et de conduction se recouvrent partiellement. Il n'y a donc pas de bande interdite et les électrons peuvent passer facilement de l'une à

l'autre. La moindre tension appliquée aux bornes de ce solide provoquera un déplacement des électrons, donc un courant électrique.

Isolant: la largeur de la bande interdite est telle que les électrons ne pourront la franchir pour passer à la bande de conduction que si une tension électrique extrêmement élevée est appliquée.

Semiconducteur: comme un isolant, sauf que les bandes de valence et de conduction sont séparées par une région interdite ne dépassant pas 2 eV. On ajoute fréquemment des impuretés aux semiconducteurs afin de former des niveaux d'énergie dans la bande interdite qui agiront en tant qu'accepteurs d'électrons (dopage « p ») ou donneurs d'électrons (dopage « n ») tel que représenté sur les figures 3 c et d. Un semiconducteur qui n'est pas dopé est dit « *intrinsèque* ».

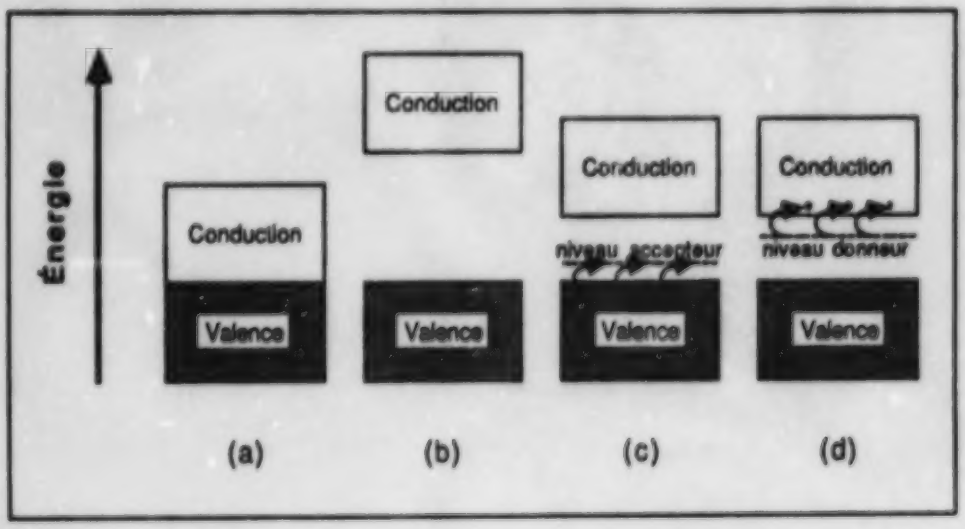


Figure 3

Représentation des bandes électroniques que l'on retrouve dans différents types de solides. a) conducteur électrique; b) isolant; c) semiconducteur dopé p; d) semiconducteur dopé n.

Pour doper positivement un semiconducteur, on incorpore dans le cristal des atomes qui ont une tendance plus forte à accepter les électrons. De façon analogue, le dopage négatif est réalisé en introduisant, dans la structure cristalline du semiconducteur, des atomes qui donneront des électrons.

Considérons par exemple un cristal de silicium (le silicium est un semiconducteur). Le silicium est dit « tétravalent » parce qu'il possède quatre électrons dans sa bande de valence. Si le fabricant remplace quelques atomes de silicium dans le réseau cristallin par des atomes trivalents (atomes comportant 3 électrons dans la bande de valence, par exemple: bore, aluminium, gallium ou indium), il se créera un manque d'électrons. Il a donc introduit une impureté acceptrice, donnant lieu à la création du niveau accepteur (figure 3c). Le semiconducteur est alors dit « dopé positivement » parce qu'il retient des électrons. Dans les semiconducteurs, on parle souvent du mouvement des « trous ». Un trou est un manque d'un électron dans la bande de valence, ce qui est équivalent à la présence d'une charge positive. Le trou n'est pas un proton.

Pour doper négativement le semiconducteur, le fabricant remplace des atomes de silicium du cristal par des atomes pentavalents (5 électrons de valence) tels que le phosphore, l'arsenic ou l'antimoine. Or, la bande de valence du cristal ne peut accepter que 4 électrons. Le cinquième électron de l'impureté est donc facilement arraché à la bande.

3.2 La jonction p-n

Une diode est constituée d'une simple jonction p-n, c'est-à-dire de la jonction entre un semiconducteur dopé positivement et un autre dopé négativement. La figure 4 explique le fonctionnement d'un tel dispositif.

Les électrons et les trous étant mobiles, ils peuvent circuler dans le cristal et un certain nombre d'entre eux traverse la jonction. Considérons les porteurs de charges dans le semiconducteur. Ce sont les trous et les électrons. Dans le semiconducteur p, il y a

beaucoup de trous et quelques électrons qui ont traversé la jonction. Les trous dans le semiconducteur p sont appelés « porteurs majoritaires » (parce qu'ils sont en grand nombre) et les électrons sont dits « porteurs minoritaires ». La situation est inverse dans le semiconducteur n. Les électrons, plus nombreux, y sont appelés « porteurs majoritaires » et ce sont les trous qui sont les porteurs minoritaires.

Les porteurs de charges circulant librement dans le cristal, un certain nombre d'entre-eux traversera la jonction. La diffusion des porteurs provoque une accumulation de porteurs minoritaires de part et d'autre de la jonction (des électrons du côté p et des trous du côté n). N'oublions pas que les impuretés font partie du réseau cristallin et ne peuvent donc pas se déplacer. Cette accumulation de charges cause l'apparition d'une barrière de potentiel, V_o, qui finit par arrêter la migration lorsque l'accumulation de charges devient suffisamment importante. Un état d'équilibre est alors atteint.

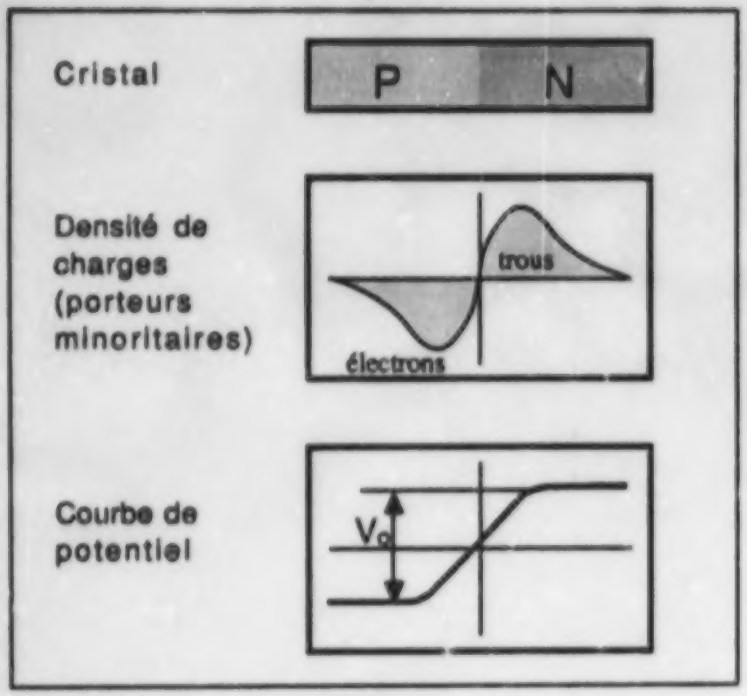


Figure 4

Distribution des charges et courbe de potentiel dans une jonction p—n

Le point important à retenir ici est que ce sont les électrons qui s'accumulent du côté p et les trous du côté n qui causent l'apparition de la barrière de potentiel et que ce sont ces charges accumulées qui empêcheront les charges du même type de traverser la jonction.

Si la jonction est polarisée en inverse, c'est-à-dire si on applique un potentiel négatif du côté p et un potentiel positif du côté n, la barrière de potentiel s'accentuera et seul un très faible courant, dû aux porteurs minoritaires, pourra circuler (Fig. 5a). L'augmentation de la barrière aura également pour effet de repousser une partie des charges qui s'étaient accumulées près de la jonction, diminuant ainsi la densité de charges près de la jonction.

Par contre, en polarisant de manière directe la jonction (c'est-à-dire en appliquant un potentiel positif au cristal p et un potentiel négatif au cristal n), on diminuera l'amplitude de la barrière de potentiel et ainsi on favorisera le passage des charges de part et d'autre de la jonction. Un courant circulera alors, causé par les porteurs majoritaires. Ce phénomène est représenté sur la figure 5b.

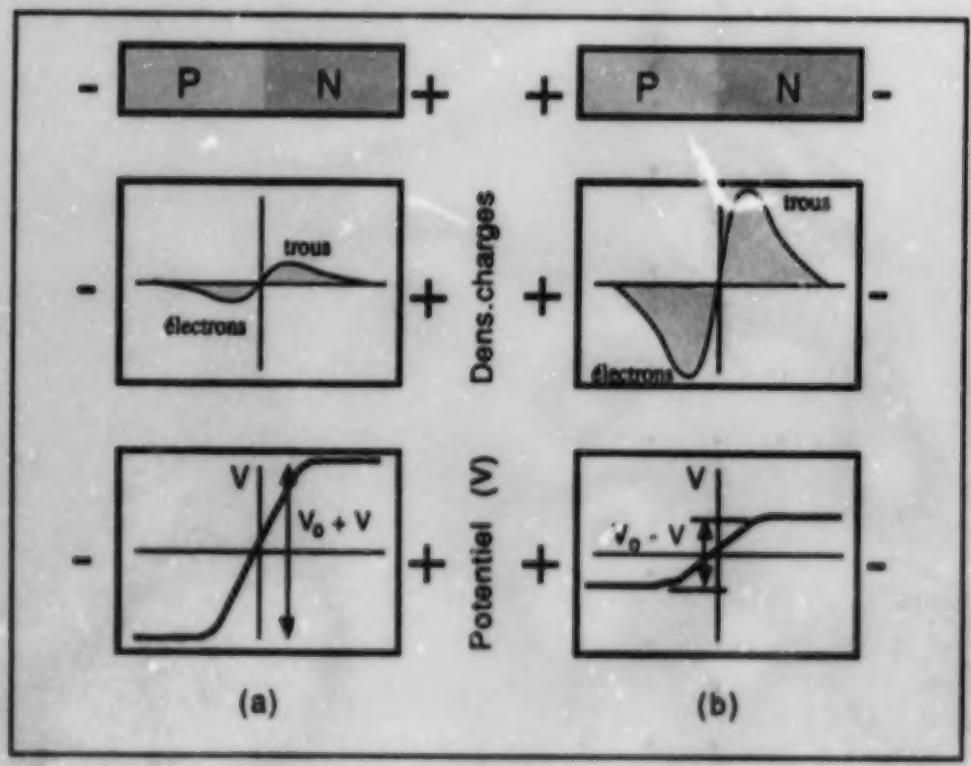


Figure 5

Effets de la polarisation sur le courant dans une jonction p—n

a) polarisation inverse; b) polarisation directe

3.3 La diode électroluminescente (DEL)

Celle-ci, comme toute autre diode, est constituée par une jonction p-n. Elle ne laisse donc passer le courant que lorsqu'elle est polarisée en direct. En traversant la jonction, les électrons passent de la bande de conduction, qui est située à un niveau énergétique élevé, pour se recombiner avec un trou qui se trouve dans la bande de valence, donc sur un niveau d'énergie moindre. Le passage de l'électron d'un niveau d'énergie élevée à un autre d'énergie moindre provoque l'émission d'un photon.

La longueur d'onde du photon émis correspond à la différence entre l'énergie qu'avait l'électron dans la bande de conduction et l'énergie qu'il possède dans la bande de valence. C'est le même principe qu'on a vu dans la section 2 où on traitait de l'émission d'un photon par un atome isolé. Par contre, dans le semiconducteur, les énergies initiales et finales ne sont pas bien définies comme elles l'étaient dans le cas de l'atome puisque les niveaux d'énergie ont été remplacés par des bandes. C'est pourquoi la lumière émise par la diode électroluminescente possèdera une distribution spectrale assez large, la bande spectrale émise étant caractérisée par une largeur de 20 à 70 nm.

La figure 9 montre comment est construite une diode DEL couplée à une fibre optique. La zone de recombinaison est d'une épaisseur d'environ 1 µm. Pour éviter l'absorption parasite des photons émis, la couche supérieure est creusée chimiquement de façon à introduire une fibre optique très près de la zone émissive.

Le rendement de couplage des diodes DEL avec une fibre optique est médiocre (de 1 à 10%) à cause de la répartition omnidirectionnelle du faisceau émis. Leur technologie est cependant assez simple, elles coûtent beaucoup moins cher que les diodes laser et elles ont des paramètres assez intéressants: puissance émise pouvant aller jusqu'à quelques dizaines de mW et bande passante de 100 MHz. On les utilise dans les liaisons optiques courtes et de faible débit.

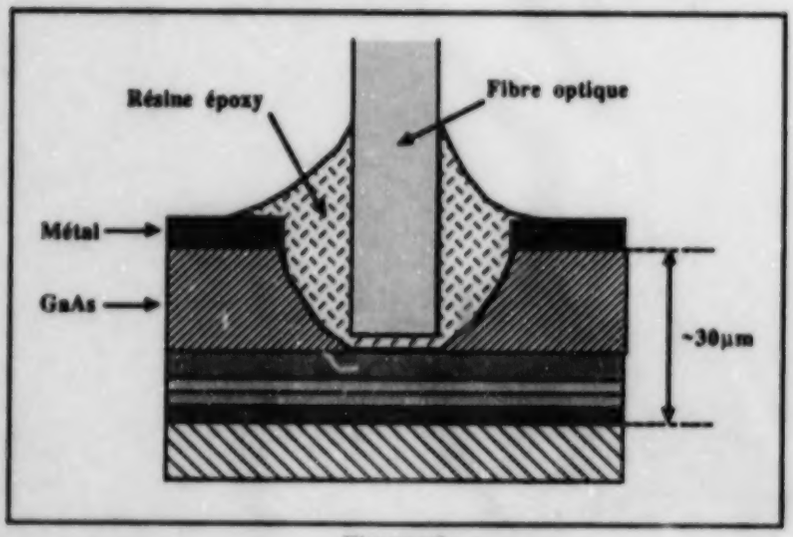


Figure 9

Schéma de construction d'une diode électroluminescente couplée à une fibre optique

3.4 La diode laser (DL)

La diode laser est, comme la DEL, une composante optoélectronique constituée d'une jonction p-n. Cependant, sa configuration est telle qu'elle émet un faisceau de lumière cohérente dite « émission laser ». Le mot LASER est un acronyme anglais pour Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplification de lumière par émission stimulée de radiation).

Pour expliquer le principe de l'émission laser, supposons qu'un certain nombre d'électrons se trouvent sur un niveau d'énergie donné. Ils peuvent descendre de ce niveau en émettant un photon de longueur d'onde λ. Or, un photon possédant justement cette longueur d'onde vient à passer. Stimulés par ce photon, les électrons descendront du niveau sur lequel ils étaient et émettront un photon dans la même phase que le photon qui passait. C'est ce qu'on appelle l'émission stimulée. Pour qu'elle se produise, il faut qu'il y ait suffisamment d'électrons sur le niveau supérieur

et aussi qu'il y ait assez de photons qui circulent pour éviter que les électrons ne redescendent du niveau avant d'avoir été stimulés. Pour augmenter la densité de photons on utilise une « cavité résonante », c'est-à-dire une enceinte délimitée par deux miroirs (un des deux miroirs est semi-réfléchissant afin de permettre au faisceau de sortir de l'enceinte). Dans les diodes lasers, la cavité résonante est constituée par le cristal semiconducteur. Un miroir est déposé d'un côté du cristal et un miroir semi-réfléchissant est déposé de l'autre côté. Les figures 10 et 11 présentent les configurations utilisées pour deux types de lasers à semiconducteurs.

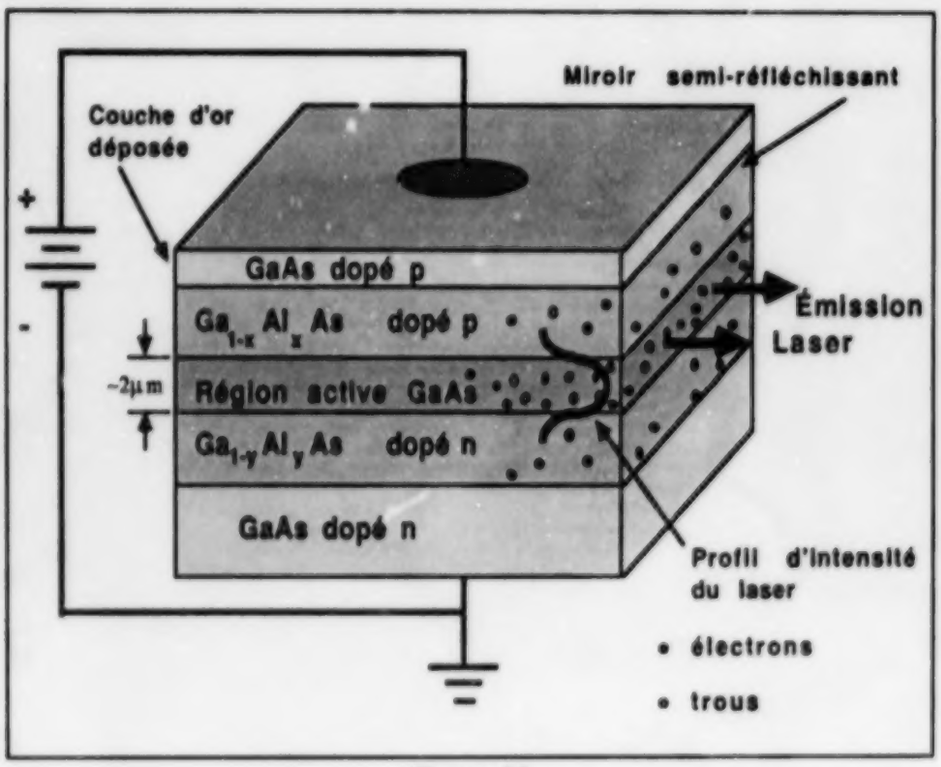


Figure 10

Schéma d'un laser typique à double hétérostructure

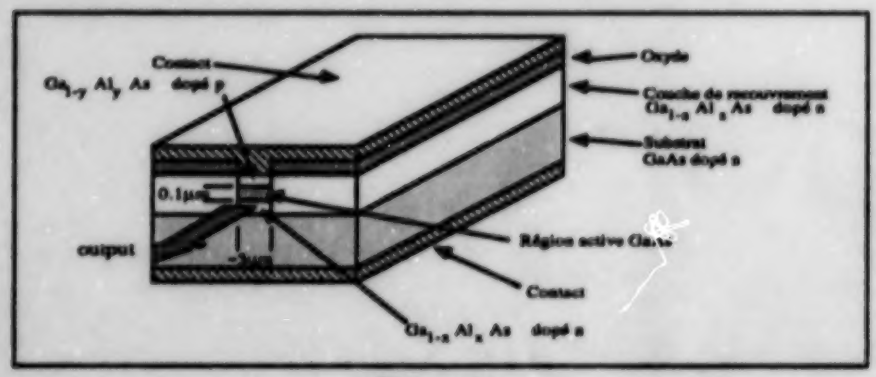


Figure 11

Schéma d'un laser à hétérostructure « enterrée » (buried)

Le tableau suivant présente quelques caractéristiques de diodes DEL et DL qu'on retrouve sur le marché.

Type	Compagnie	Longueur d'onde (λ)	Largeur spectrale ($\Delta\lambda$)	Puissance maximale	Courant typique de fonctionnement	Commentaires
LCW-10 (diode laser)	Laser Diode Inc (Canada)	830 nm	2.5 nm	14 mW	90 mA	Opération continue
LD-68 (diode laser)	Laser Diode Inc (Canada)	904 nm	3.5 nm	20 W	20 A	Opération en impulsion
LDT-362 (DEL)	Laser Diode Inc (Canada)	1300 nm	70 nm	200 µW	200 mA	Opération continue "pig tail" avec 1 m de fibre 50/125µm
LT015MD (diode laser)	Sharp (Japon)	830 nm	2.5 nm	40 mW	100 mA	Opération continue
HE8801 (DEL)	Hitachi (Japon)	880 nm	30 nm	20 mW	120 mA	Opération continue
SDL-2450-C (diode laser)	Spectre Diode Labs (USA)	810 nm	10 nm	500 mW	1600 mA	Opération continue

Tableau 1

Principaux paramètres des diodes électroluminescentes ainsi que des diodes laser fabriquées par différentes compagnies

4. Les lasers à hélium-néon

Ce type de lasers n'est pas utilisé dans le domaine des télécommunications. La raison principale de ce fait est qu'il n'est pas modulable directement. On le retrouve cependant dans des machines FAX et dans des imprimantes au laser où la modulation est produite à l'aide d'un modulateur acousto-optique.

Le coeur d'un tel laser est un tube de verre dans lequel se produit une décharge. Le médium dans ce tube est constitué d'un mélange gazeux composé essentiellement d'hélium (90%) et de néon (10%). L'hélium, excité par le courant électrique, communique par collisions son énergie au néon dans lequel une émission laser peut se produire. Les miroirs qu'on voit à la figure 12 permettent de sélectionner l'une des trois longueurs d'onde possibles. La raie rouge à 632,8 nm est la seule qui soit située dans le domaine du visible.

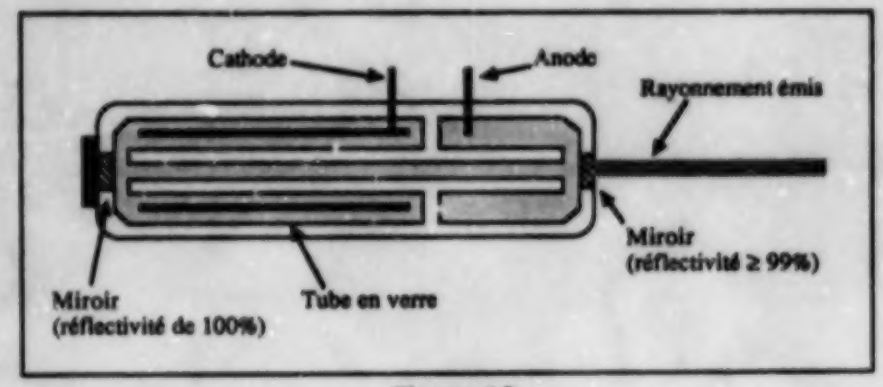


Figure 12

Schéma d'un laser à He-Ne

EXPÉRIENCE

Partie I

Mesure de la caractéristique puissance-courant d'une diode électroluminescente

La figure 13 présente un schéma de la plaquette utilisée pour la caractérisation des diodes électroluminescentes.

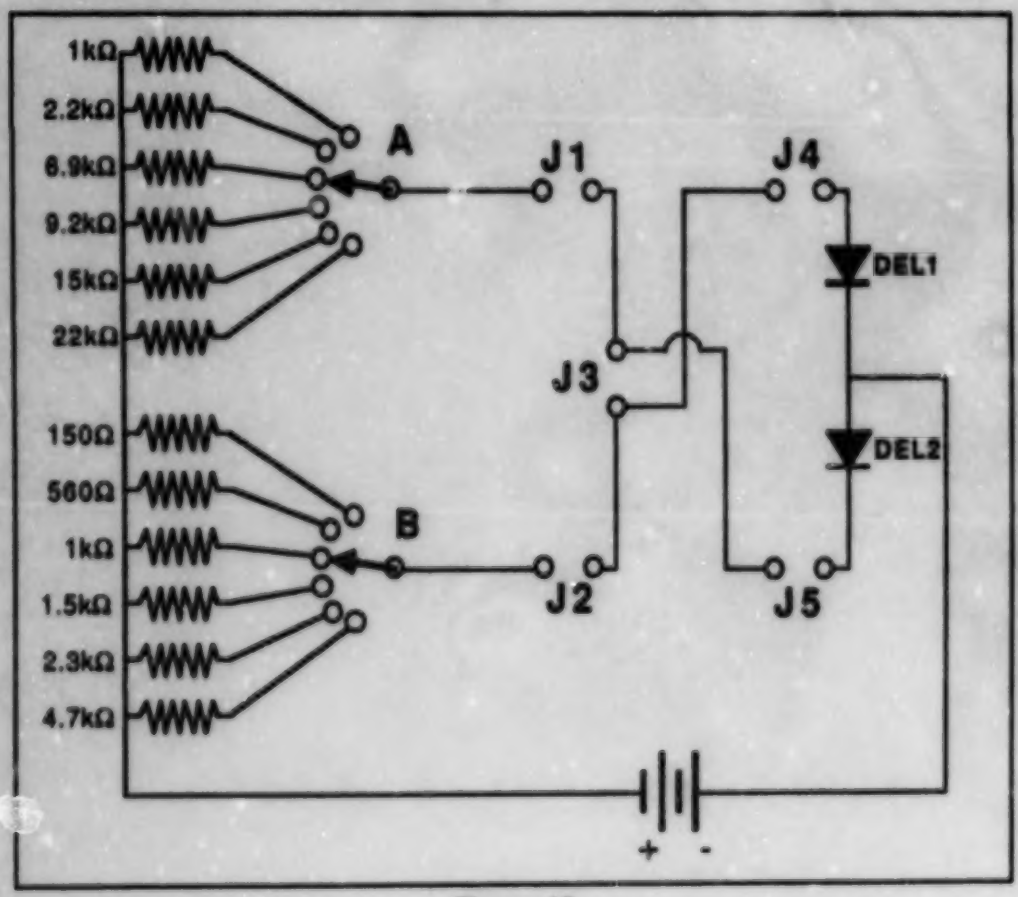


Figure 13

Montage du système expérimental pour la caractérisation des diodes DEL.

1. Reliez le photomètre au montage à l'aide d'un lien en fibre optique afin de mesurer l'intensité émise par la diode DEL1.

2. Insérez un contact à la position J1, l'ampèremètre entre les bornes J3 et le voltmètre aux bornes de la DEL no.1. Pour chacune des 6 positions du bouton A, notez la puissance optique, le courant et la tension aux bornes de la diode.

3. Retirez le contact en J1 et replacez-le en J2. Pour chacune des 6 positions du bouton B, notez la puissance optique, le courant et la tension aux bornes de la diode.

4. Répétez les étapes 1, 2 et 3 mais en utilisant la diode DEL2.

5. Tracez les graphiques suivants pour chacune des 2 diodes électroluminescentes:
   - Puissance optique versus courant
   - Tension versus courant.

Partie II

Mesure des caractéristiques d'une diode laser (DL)

La figure suivante présente un schéma du montage utilisé pour la caractérisation d'une diode laser:

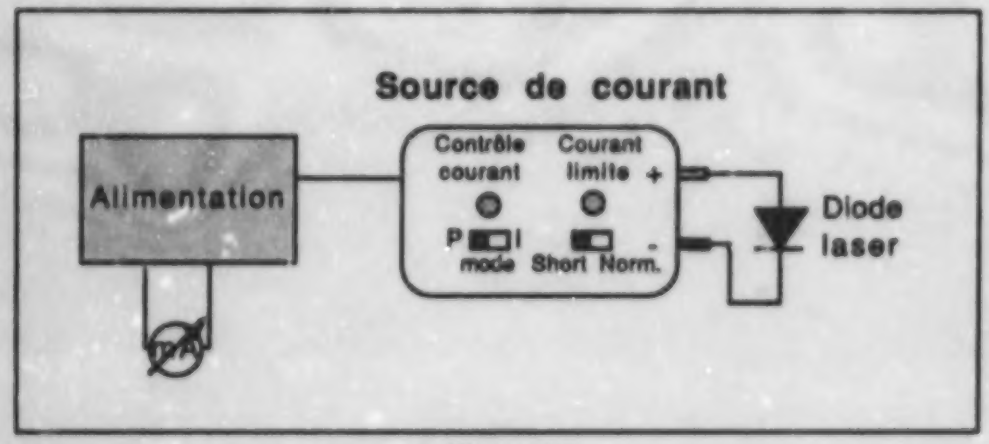


Figure 14

Schéma de l'ensemble expérimental pour la caractérisation des diodes laser.

La diode laser est un dispositif fragile et dispendieux. Soyez certains de bien suivre les étapes suivantes à la lettre afin d'éviter de l'endommager.

1. Le contrôleur est muni de 2 vis de réglage ainsi que de 2 commutateurs. Réglez le commutateur de droite à « **SHORT** ». Aucun courant ne pourra circuler dans la diode laser et on pourra ainsi régler le circuit sans risquer de la brûler.

2. Le commutateur de droite (mode) sert à choisir le mode de fonctionnement: puissance constante ou courant constant. Réglez-le sur **courant constant**.

3. À l'aide de la fibre optique, reliez le photomètre à la diode laser. Branchez l'ampèremètre et le contrôleur à l'alimentation.

4. **Réglage du courant limite.** Allumez l'alimentation électrique. L'interrupteur de droite du contrôleur étant à la position « SHORT », réglez la vis de courant limite à une valeur légèrement inférieure aux spécifications maximales de la diode laser utilisée. Ensuite, diminuez le courant à l'aide de la vis de gauche (contrôle courant).

5. Notez la puissance optique émise pour une quinzaine de valeurs du courant (pour le réglage, utilisez la vis « contrôle du courant »).

6. Tracez les graphiques de la puissance optique versus courant ainsi que de la tension versus courant. Déterminez le courant de seuil.

Questions

1. Soit un atome possédant 3 niveaux d'énergie:
   - 0 eV (niveau fondamental)
   - 13.0 eV
   - 13.5 eV

   Calculez l'énergie (en eV) de chacun des 3 photons pouvant être émis par cet atome ainsi que les longueurs d'ondes correspondantes. Utilisez la figure 1 pour identifier la région du spectre électromagnétique correspondant à chacun des 3 photons. Notez vos résultats dans le tableau 1.

2. D'après vos résultats expérimentaux obtenus pour les diodes électroluminescentes et laser, dites comment la puissance optique varie en fonction du courant (linéairement, exponentiellement, ...)

Photon #	Énergie (eV)	Longueur d'onde (m)	Région spectrale
1			
2			
3			

Tableau 1

Réponse à la question 1.

	Résistance (Ω)	DEL #1 Tension (V)	DEL #1 Courant (A)	DEL #1 Puiss.optique (nW)	DEL #2 Tension (V)	DEL #2 Courant (A)	DEL #2 Puiss.optique (nW)
A	22000						
	15000						
	9200						
	6900						
	2200						
	1000						
B	4700						
	2300						
	1500						
	1000						
	560						
	150						

Tableau 2

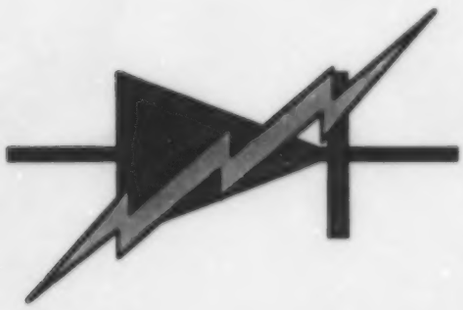
Résultats expérimentaux pour la caractérisation des diodes DEL.

DIODE LASER			
Courant (A)	Puissance optique (nW)	Courant (A)	Puissance optique (nW)

Tableau 3

Résultats expérimentaux pour la caractérisation de la diode laser

LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE



Centre I

Expérience 3

Caractérisation des détecteurs optiques

CARACTÉRISATION DES DÉTECTEURS OPTIQUES

Objectifs:

1. Apprentissage des principes de fonctionnement des détecteurs optiques.
2. Caractérisation d'un détecteur opéré dans les modes de photorésistance et photovoltaïque.

Matériel:

1. Plaquette d'expérimentation sur les détecteurs optiques
2. Alimentation électrique 5 V d.c.
3. Ampèremètre
4. Appareil de mesure de la puissance optique.
5. Source de lumière de puissance réglable
   (vous pouvez utiliser le montage de l'expérience 2)

INTRODUCTION

Le principe de fonctionnement des photodétecteurs est basé sur le phénomène physique réciproque de celui utilisé dans les diodes électroluminescentes (DEL). Tout comme ces dernières, les photodétecteurs sont composés de jonctions entre semiconducteurs de dopages différents.

Le but d'un photodétecteur est de transformer l'énergie lumineuse en un courant électrique. Lorsqu'un photon frappe le semiconducteur, il peut être absorbé et son énergie permet à un électron de sauter de la bande de valence à la bande de conduction. On assiste alors à l'apparaition d'un couple électron-trou. Si la photo-excitation s'est produite dans le matériel de type p, l'électron sera le « *porteur minorito're* » et il diffusera vers la jonction. Il participera au photo-courant s'il parvient à traverser la jonction avant de s'être recombiné. Dans le cas où la photo-excitation se produit dans le matériel de type n, le même raisonnement s'applique mais en considérant la diffusion du trou (dans le semiconducteur de type n, c'est le trou qui est considéré comme « *porteur minoritaire* »).

Un photodétecteur ne réagit pas à toute lumière. La bande spectrale qu'il permettra de détecter dépend de la nature du matériau utilisé. En effet, c'est la largeur de la bande interdite qui détermine la longueur d'onde maximale qui peut être absorbée par un dispositif donné. Le tableau suivant présente une liste de quelques matériaux utilisés dans la fabrication de photodétecteurs avec la largeur de la bande interdite et la longueur d'onde maximale correspondant à chacun.

Matériau	Si	Ge	GaAs	$Ga_x In_{1-x} As$	$Ga_x In_{1-x} As_y P_{1-y}$
Wg (eV)	1,1	0,72	1,43	1,43 à 0,36	1,35 à 0,36
λ_c (nm)	1100	1700	870	870 à 3440	920 à 3440

Largeur de bande interdite et longueur d'onde critique pour certains matériaux utilisés pour les détecteurs

Les paramètres les plus importants des photodétecteurs sont les suivants:

- Le rendement quantique η, qui caractérise le rapport du nombre de couples électron-trou générés sur le nombre de photons incidents. Le photo-courant obtenu peut être alors déterminé comme:

$$I_{ph} = q \eta I_o$$

où I_{ph} est l'intensité du photo-courant
I_o est le nombre de photons incidents par unité de temps
q est la charge d'un électron ($1{,}6021 \cdot 10^{-19}$ C)

- Rapidité, caractérisée par le temps de réponse d'une diode

- Sensibilité, qui caractérise le rendement global de transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique:

$$S = \frac{I_{ph}}{I_o \, h\nu}$$

où h est la constante de Planck ($6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J·s)
ν est la fréquence de l'onde lumineuse
($h\nu$ est l'énergie d'un photon)

Si aucune tension n'est appliquée sur la jonction p-n, le mouvement des porteurs minoritaires ne s'effectuera que par diffusion. Il en résulte que l'efficacité quantique ainsi que la sensibilité et la rapidité sont faibles. Ce mode de fonctionnement d'un photodétecteur est dit "*photovoltaïque* ".

L'application d'une tension électrique à la jonction p-n cause l'apparition d'un champ électrique qui accélèrera les porteurs minoritaires (créés par photo-excitation) vers la jonction. Il en résulte qu'un courant électrique traverse le semiconducteur, l'intensité de

ce courant étant proportionnelle au nombre de charges créées par photo-excitation, donc proportionnelle à l'illumination de la jonction. Au niveau du circuit électrique, on voit la résistance du dispositif varier en fonction de son illumination. Ce mode d'opération est par conséquent appelé *"photorésistance"*. La figure suivante le représente.

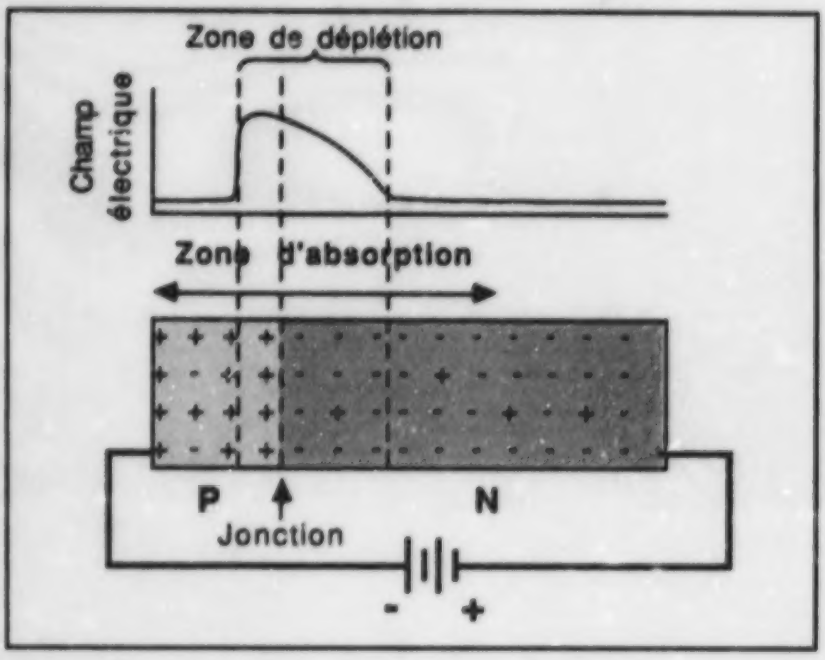


Figure 1

Jonction p-n dans une photodiode polarisée. Cette jonction a été fabriquée par diffusion d'impuretés de type p dans un substrat de type n. La lumière pénètre dans le cristal par la gauche. Les charges générées par les photons de longueur d'onde trop courte ou trop longue seront absorbées avant de traverser la jonction et ne contribueront donc pas au photo-courant.

Dans le mode de photo-résistance, bien que les photons puissent produire des photo-excitations dans presque tout le cristal, seules les charges générées dans la zone de déplétion bénéficient d'un champ électrique intense qui permettra de les accélérer vers la jonction. Cette région du cristal possède donc une sensibilité et une rapidité accrues.

C'est pourquoi les manufacturiers ont tenté d'étirer la zone de déplétion. Pour ce faire, ils insèrent un semiconducteur non dopé (intrinsèque) entre les semiconducteurs p et n, donnant lieu à une jonction p-i-n (positif-intrinsèque - négatif). La figure 2 présente le schéma de fonctionnement de ce dispositif.

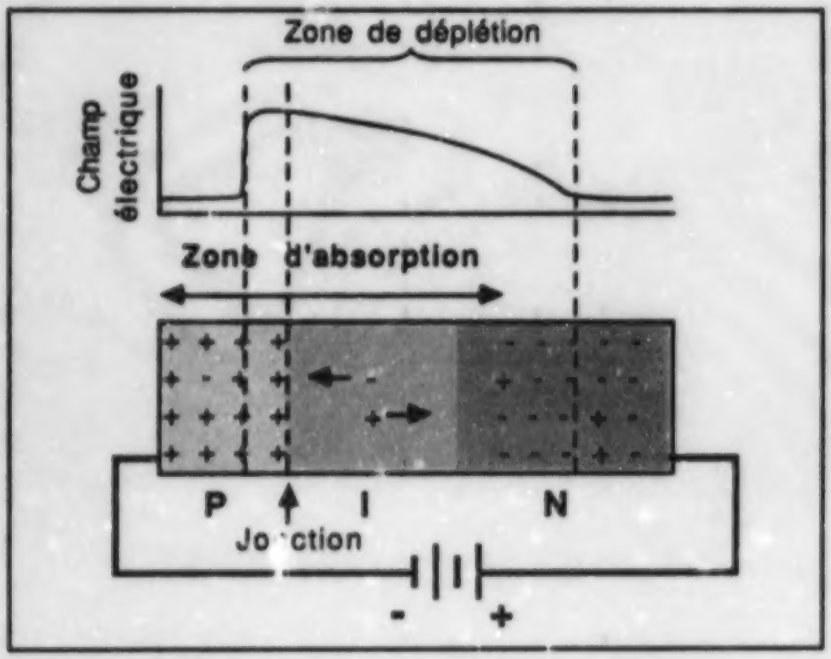


Figure 2

Schéma de fonctionnement d'une photodiode p-i-n. On remarque que la zone de déplétion est maintenant plus grande que la zone d'absorption. Il en résulte une sensibilité accrue.

EXPÉRIENCE

1. Faites le montage du système de mesure selon la figure 3:

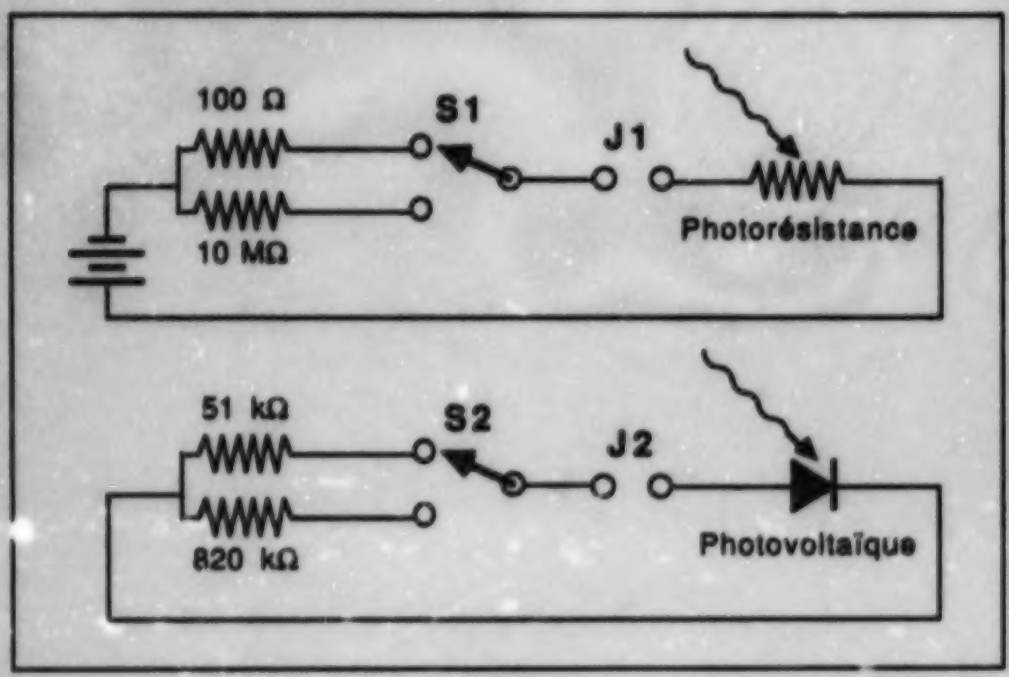


Figure 3

Montage du système expérimental pour la caractérisation des détecteurs optiques

PHOTORÉSISTANCE

2. Installez l'ampèremètre entre les bornes J1 et branchez la source d'alimentation +5V d.c. Réglez le commutateur S1 à la position 100Ω.

3. Allumez la photodiode. Mesurez la puissance optique à l'aide du photomètre et notez-la dans le tableau 1.

4. Éclairez la photorésistance et notez la valeur du courant électrique qui la traverse.

5. Répétez les étapes 3 et 4 pour une dizaine de valeurs de la puissance optique.

6. Répétez l'expérience avec le commutateur S1 dans la position 10MΩ. Notez les résultats dans le tableau 1.

MODE PHOTOVOLTAÏQUE

7. Branchez l'ampèremètre entre les bornes J2. Procédez de manière analogue à la section précédente. Réglez le commutateur S2 en position 51kΩ. Mesurez le courant généré par la photodiode pour une dizaine de valeurs de l'illumination. Notez les résultats dans le tableau 2.

8. Répétez l'étape 7 avec le commutateur S2 en position 820kΩ.

Questionnaire

1. Pour chacune des données expérimentales du tableau 1, calculez la valeur de la résistance. Tracez un graphique de la valeur de la photorésistance en fonction de la puissance d'illumination (tracez 2 courbes, une pour chaque position du commutateur S1).

2. Pour quelle position du commutateur S1 la tension de polarisation de la photorésistance est-elle la plus élevée? Dites pourquoi.

3. Discutez brièvement de l'allure des courbes et comparez-les.

4. Tracez les courbes du courant généré en fonction de la puissance d'illumination lorsque le photodétecteur est opéré dans le mode photovoltaïque. (2 courbes)

5. Comparez les courbes et expliquez.

S1 = 100 Ω		S1 = 10 MΩ	
Puissance optique (nW)	Courant (mA)	Puissance optique (nW)	Courant (mA)

Tableau 1

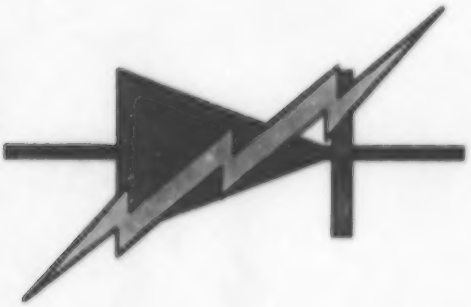
Résultats expérimentaux pour la caractérisation d'une photorésistance

S2 = 51 kΩ		S2 = 820 kΩ	
Puissance optique (nW)	Courant (mA)	Puissance optique (nW)	Courant (mA)

Tableau 2

Résultats expérimentaux pour la caractérisation d'un détecteur optique opéré dans le mode photovoltaïque.

LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE



Centre I

Expérience 4

Caractéristiques spectrales des systèmes de transmission

CARACTÉRISTIQUES SPECTRALES DES SYSTÈMES DE TRANSMISSION

Objectifs:

1. Étude des relations spectrales des paramètres caractéristiques de fibres optiques
2. Étude des conséquences pratiques de ces relations sur le problème d'optimisation et sur le choix des éléments constitutifs d'un système de communication

Matériel:

1. Source de lumière blanche: lampe tungstène-halogène
2. Alimentation stabilisée pour la source lumineuse
3. Cube diviseur de la lumière
4. Monochromateur fonctionnant dans l'intervalle de longueurs d'ondes de 0,4 à 0,7 µm
5. Deux photodétecteurs
6. Fibre optique de longueur connue (longueur minimale de 100 m)
7. Coupleur mécanique source-fibre
8. Multimètre numérique (Fluke 8020B par exemple)
9. Banc optique et manipulateurs

INTRODUCTION

L'atténuation constitue l'un des paramètres les plus importants dans la caractérisation de fibres optiques, et particulièrement dans le cas des applications en communications. En effet, la connaissance de ce paramètre est essentielle au calcul de la distance limite que peut parcourir le signal optique véhiculé par la fibre considérée, entre deux stations de répétitions des signaux.

L'intensité de la lumière véhiculée par une fibre décroît en fonction de la distance parcourue selon une fonction exponentielle:

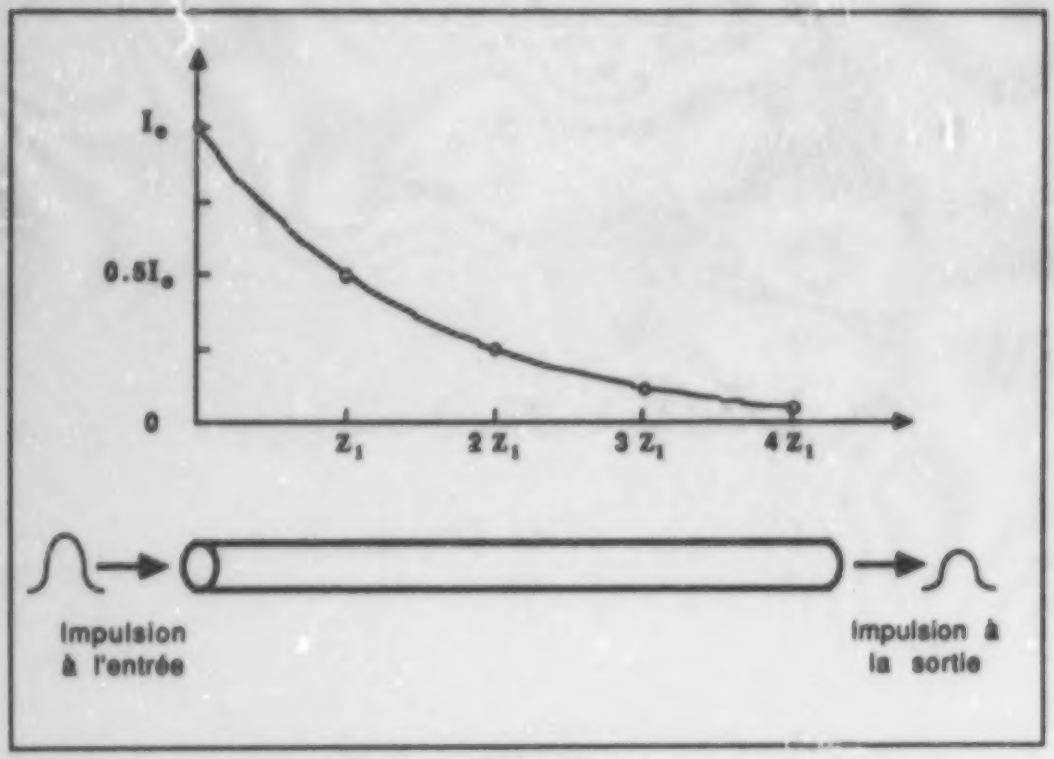


Figure 1

Intensité du signal dans une fibre en fonction de la longueur de cette fibre

L'équation décrivant cette décroissance du signal est la suivante:

$$I(r) = I_0 \exp(-\alpha r)$$

où I_0 est l'intensité du signal à l'entrée de la fibre
$I(r)$ est l'intensité du signal après une distance "r"
α est le coefficient d'atténuation du signal par unité de distance parcourue (unités typiques: km^{-1} ou en dB/km)

En utilisant la définition du décibel, on peut recalculer α en km^{-1} à partir de sa valeur en dB/km. On procède ainsi:

$$dB = 10 \log_{10}\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$$

En faisant entrer le 10 dans le logarithme:

$$dB = \log_{10}\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{10}$$

En mettant chaque côté de cette équation en exposant de 10, on obtient:

$$10^{dB} = 10^{\log_{10}(A_2/A_1)^{10}}$$

$$10^{db} = (A_2/A_1)^{10}$$

Et on obtient finalement, en élevant chaque côté de l'équation à la puissance 1/10:

$$10^{dB/10} = A_2 / A_1$$

Supposons par exemple que α est égal à 2dB/km. Exprimé en km^{-1}, ce sera:

$$\alpha = 10^{0,2} \ km^{-1}$$

Une caractéristique très importante du coefficient d'atténuation α est qu'il dépend étroitement de la longueur d'onde de la lumière véhiculée dans la fibre. Cette dépendance spectrale est clairement illustrée par la figure 2:

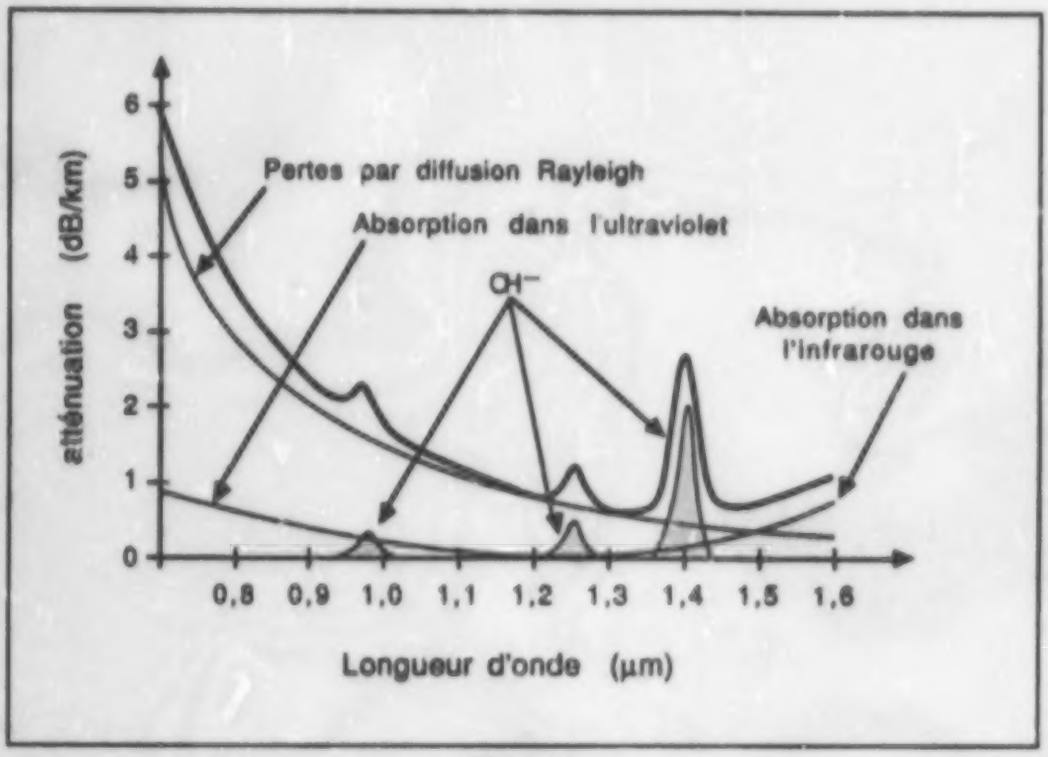


Figure 2

Graphique montrant la dépendance du coefficient d'atténuation de la fibre en fonction de la longueur d'onde.

Trois facteurs jouent un rôle important dans le phénomène d'atténuation et sont responsables de la dépendance spectrale ci-haut mentionnée. La diffusion Rayleigh est responsable de la première partie du graphique et montre une dépendance par rapport à la longueur d'onde en λ^{-4}. Cette diffusion est causée par les fluctuations de densité du matériau, les variations locales d'indice de réfraction ainsi que par la présence de micro-défauts et de micro-courbures. Ces perturbations entraînent des échanges d'énergie entre les modes guidés et non-guidés, ce qui augmente l'énergie des modes rayonnants et des modes à fuite.

La deuxième partie de la figure 2, soit le sommet atteint vers λ~0,4 µm, est provoquée par l'absorption de l'énergie lumineuse par les électrons associés aux impuretés, ainsi que par les vibrations de certaines molécules. Dans les fibres modernes, on a réussi à réduire l'influence des ions métalliques tels que Fe, Cu, V, Co, Ni, Mn et Cr. La plupart des pertes dans cet intervalle de longueurs d'ondes sont causées par les vibrations des ions hydroxyles (OH^-).

Finalement, la troisième partie de la figure 2 est due aux micro- et macrocourbures ainsi qu'à la présence d'un plus grand nombre de modes à fuite. L'influence des micro- et macrocourbures est brièvement expliquée à la figure 3:

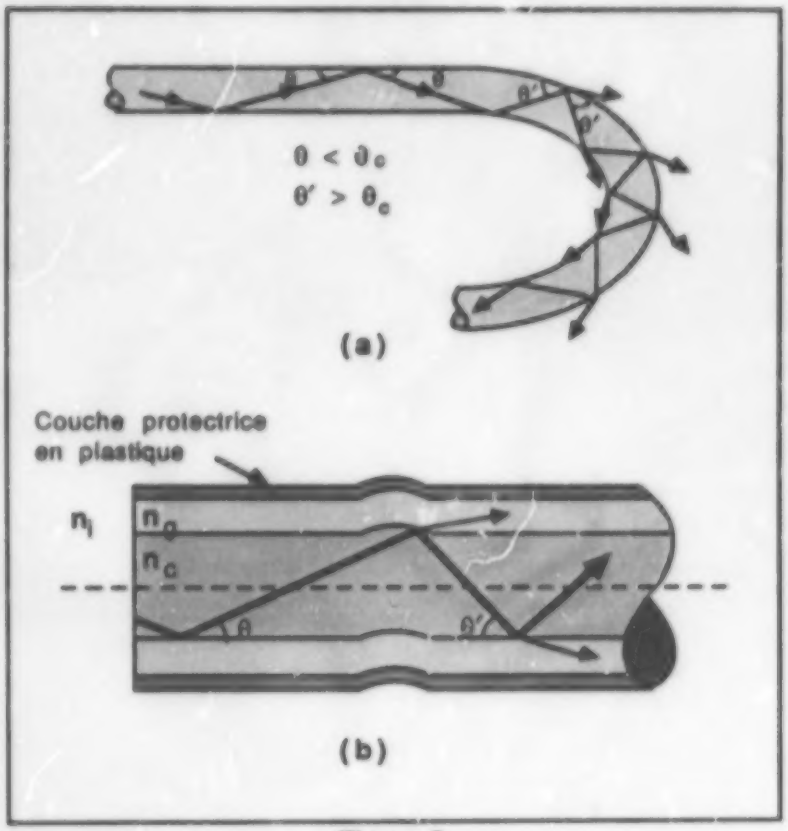


Figure 3

Influence des micro- et macrocourbures sur la propagation de la lumière dans la fibre.

Selon la figure 2, il y a deux intervalles de longueurs d'ondes particulièrement intéressants pour les applications pratiques. On les appelle traditionnellement première et deuxième fenêtres spectrales:

- Première fenêtre spectrale: 800 - 1100 nm
- Deuxième fenêtre spectrale: 1500 - 1600 nm

La deuxième fenêtre semble être la plus avantageuse. Cependant, les recherches sur les sources de rayonnement et sur les détecteurs compatibles avec cet intervalle de longueurs d'ondes ne sont pas encore entièrement terminées.

Exp. 4: Caractéristiques spectrales des systèmes de transmission

EXPÉRIENCE

1. Montez le système de transmission selon la figure 4.

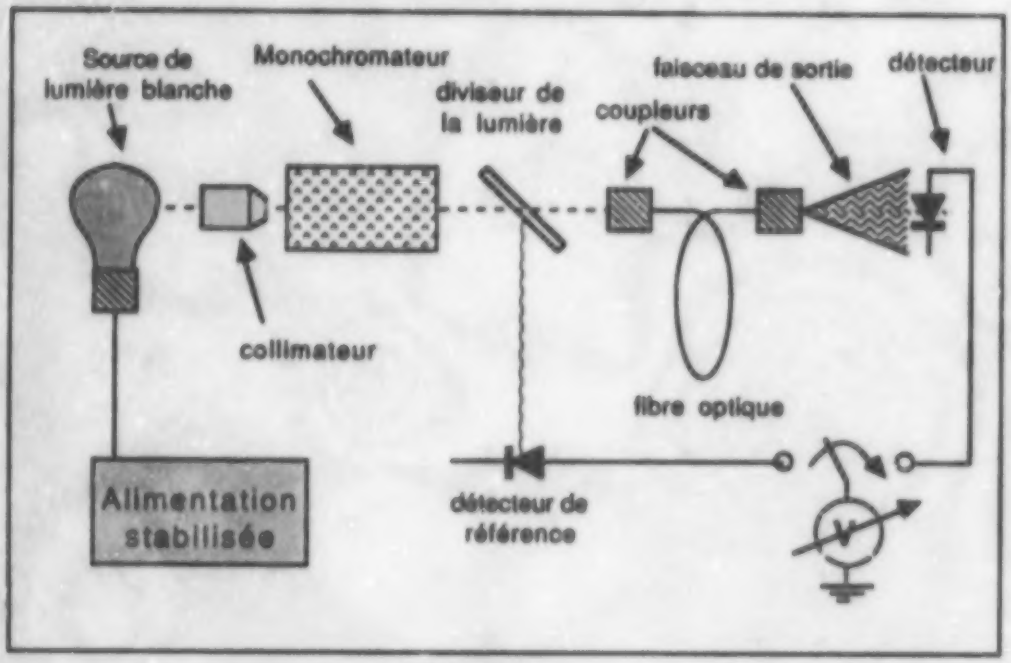


Figure 4

Schéma expérimental pour l'étude des caractéristiques spectrales des systèmes de transmission

2. Notez la tension électrique lue sur le voltmètre avec le commutateur en position 1. Cette tension correspond à l'intensité I_0 de la lumière qui entre dans la fibre (on ne tient pas compte des pertes de couplage parce qu'elles ne dépendent pas de la longueur d'onde).

3. Placez le commutateur du voltmètre à la position 2. Notez la tension indiquée. Celle-ci correspond au signal I_λ, c'est-à-dire le signal qui sort de la fibre après avoir été atténué par son passage dans la fibre.

4. Répétez les étapes 2 et 3 pour au moins 20 longueurs d'ondes différentes dans la plage 400 - 700 nm.

5. Calculez l'atténuation de la fibre en dB/km en utilisant la formule suivante:

$$\alpha = (1/Z) \cdot 10 \log_{10}(I_\lambda/I_O)$$

où Z est la longueur de la fibre (en km).

6. Répétez les mesures pour une ou deux autres fibres.

7. Inscrivez vos résultats dans le tableau présenté sur la page finale du cahier.

8. Faites le graphique de α en fonction de la longueur d'onde.

Questionnaire

1. Expliquez les effets responsables de l'atténuation des signaux optiques dans les fibres.

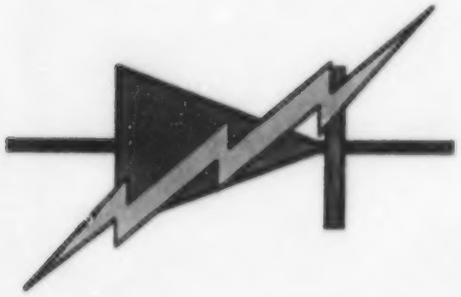
2. Comment peut-on expliquer la caractéristique spectrale d'atténuation qu'on mesure dans cette expérience?

3. Est-ce que l'utilisation d'un rayonnement ultraviolet dans la plage de longueurs d'ondes de 200 à 400 nm peut se justifier pour effectuer une transmission à l'aide des fibres optiques? Expliquez.

λ [nm]	I_0	I_λ	α [dB/km]

Exp. 4: Caractéristiques spectrales des systèmes de transmission

LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE



Centre II

Expérience 5

Systèmes de couplage de la lumière

SYSTÈMES DE COUPLAGE DE LA LUMIÈRE

Objectifs:

1. Étude des phénomènes de couplage entre les sources et les détecteurs avec les fibres optiques
2. Étude des coupleurs bidirectionnels

Matériel:

1. Sources de la lumière:
   - laser He-Ne ou
   - diode électroluminescente (DEL)
2. Fibres monomodes et multimodes
3. Système de couplage basé sur les lentilles GRIN
4. Système de couplage basé sur un objectif de microscope
5. Coupleur bidirectionnel
6. Appareil de mesure de la puissance optique ANDO AQ - 2101
7. Banc d'optique et les manipulateurs

INTRODUCTION

1. Couplage dans le système 'source de la lumière - fibre optique'

Pour que la lumière puisse se propager dans une fibre optique, il faut qu'elle entre dans le cœur optique sous un angle inférieur à θ_{max}:

$$n_i \sin \theta_{max} = NA$$

où n_i = indice de réfraction du milieu externe (pour l'air, $n_i = 1$)
NA = ouverture numérique de la fibre (voir expérience 1)

La quantité de lumière qui peut se propager dépend alors de l'angle d'entrée, lequel peut être défini à la fois par deux facteurs bien distincts: l'ouverture numérique de la fibre et le diagramme de rayonnement (directivité) de la source, précisant les angles sous lesquels la lumière est émise.

Le cône d'acceptance d'une fibre n'est que très rarement compatible avec le cône d'émission d'une source; si l'on tient compte par ailleurs de ce que la surface d'un spot lumineux doit le plus souvent être réduite au minimum — par exemple dans le cas de fibres monomodes, le diamètre du cœur est normalement inférieur à 7 µm —, il apparaît clairement qu'un système optique intermédiaire est nécessaire pour rendre le complexe source - fibre suffisamment efficace.

Les pertes de couplage peuvent être évaluées schématiquement tel qu'illustré à la figure 1:

$$P_c = 10 \text{ Log } \frac{S_c}{S_{eff}} \qquad S_{eff} > S_c$$

$$P_c = 0 \qquad S_{eff} < S_c$$

où: S_C = surface du cœur
S_{eff} = surface effective de la source pour une distance « d »

Exp. 5: Systèmes de couplage de la lumière

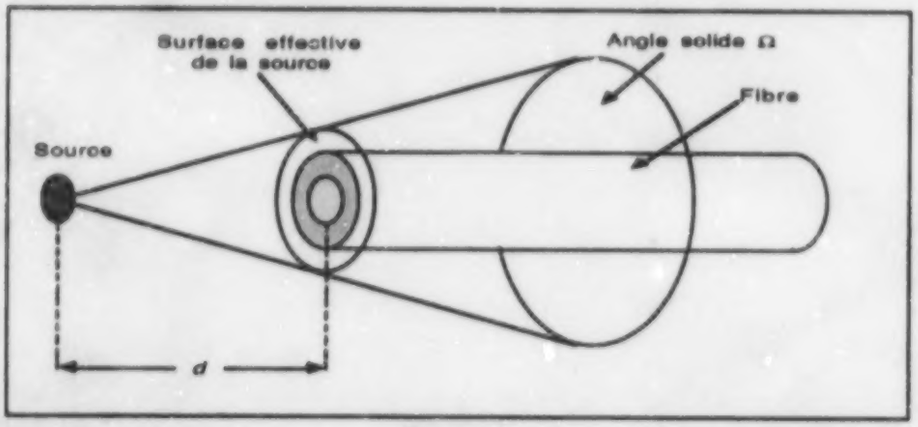


Figure 1

Couplage entre une source et une fibre séparées par une distance *d*.

Cette expression exprime le rapport du flux énergétique couplé au flux énergétique arrivant qui caractérise bien l'efficacité du couplage.

Deux méthodes permettent d'augmenter sensiblement cette efficacité.

- La première, qui est aussi la plus simple, s'applique aux sources émettant un faisceau lumineux quasi parallèle, comme on peut l'observer par exemple dans le cas d'un laser He-Ne. Il s'agit, ici, d'utiliser une lentille (le plus souvent un objectif de microscope) entre un laser et la fibre de manière à réfracter les rayons émis et que leur direction corresponde à celle du cône d'acceptance de la fibre. L'objectif doit être fixé sur un manipulateur directionnel (XYZ) et angulaire, facilitant ainsi un ajustement précis du couplage.

- La deuxième méthode, plus spécialisée, permet de coupler des diodes DEL et des lasers à semiconducteurs ayant une caractéristique angulaire d'émission. Pour ce faire, on utilise des lentilles de très petit diamètre — appelées SELFOC au Japon et GRIN (GRaded INdex lenses) aux États-Unis — fabriquées à partir d'un matériau à gradient d'indice de réfraction. Les différentes configurations de ces

lentilles (quart d'onde, demi-onde) et leur application aux couplages de type fibre-fibre, fibre-source ou fibre-détecteur sont illustrées à la figure 2. Afin de diminuer les pertes — lesquelles peuvent atteindre 3 dB par lentille —, ces lentilles sont souvent recouvertes d'une couche anti-réflexion.

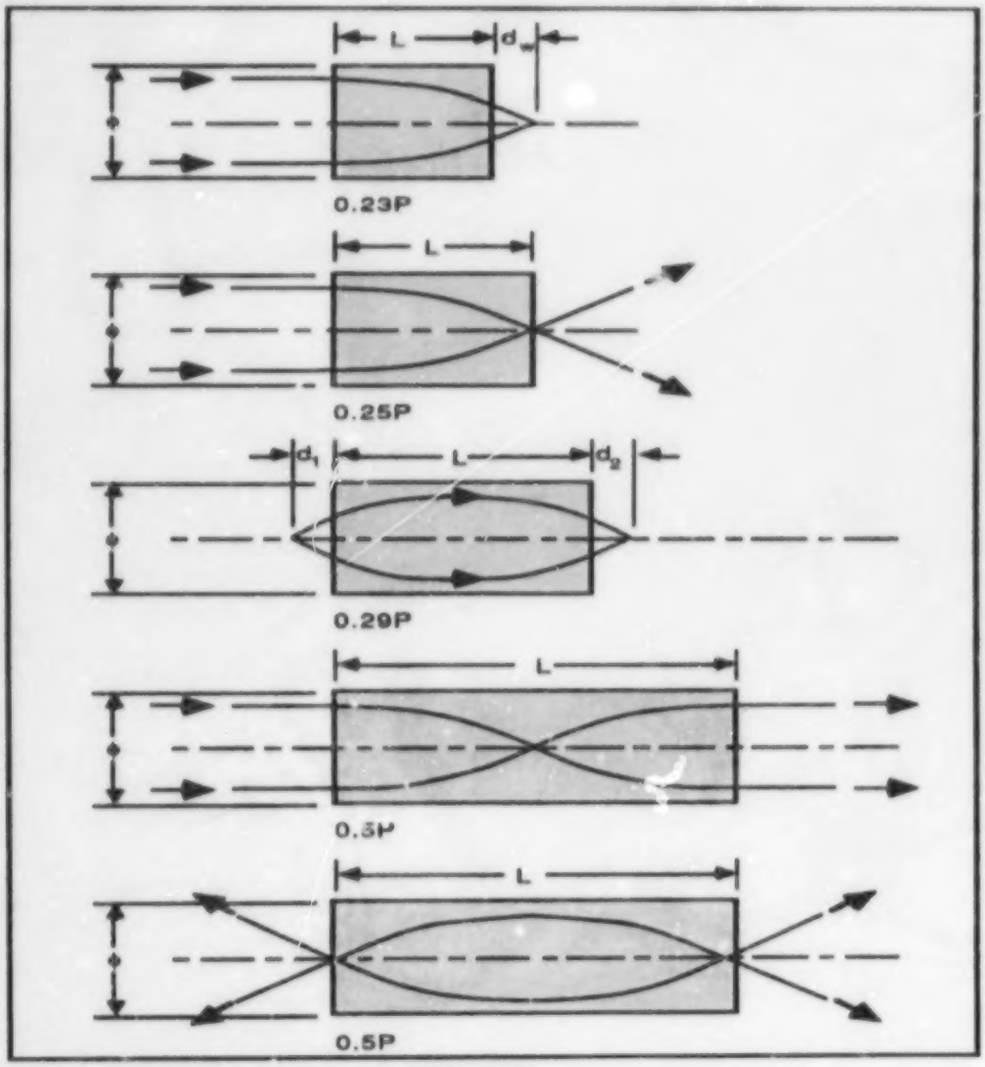


Figure 2

Fonctionnement des lentilles cylindriques GRIN

2. Coupleur bidirectionnel

À l'aide d'un coupleur bidirectionnel, on réalise un couplage fibre-fibre par division du faisceau lumineux d'entrée en deux ou plusieurs faisceaux de sortie. Ces coupleurs sont indispensables à la distribution des données dans un système de communication optique. Un exemple de ce système, utilisant deux coupleurs 2 × 2 en configuration bidirectionnelle, est schématisé dans la figure 3.

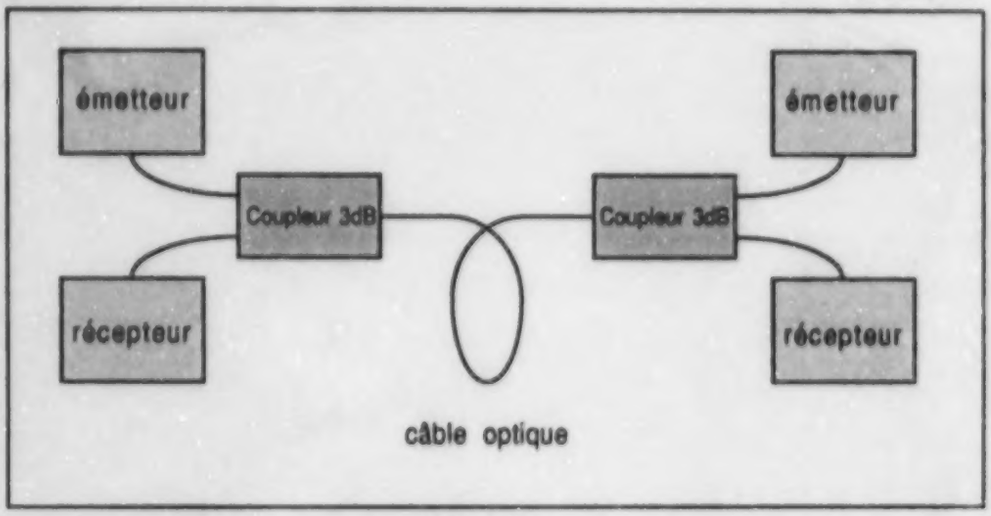


Figure 3

Système bidirectionnel de communication optique

Le principe de fonctionnement d'un coupleur bidirectionnel (illustré à la figure 4) repose sur une déformation localisée de la fibre principale de sorte que les rayons à fuite sont excités par couplage. De nos jours, les coupleurs sont presque tous réalisés par la méthode de fusion, tel qu'illustré dans la figure 5: on applique une certaine tension mécanique sur les fibres afin de les réunir, puis on les soumet à la chaleur d'un arc pour les faire fondre et les fusionner.

2. Coupleur bidirectionnel

À l'aide d'un coupleur bidirectionnel, on réalise un couplage fibre-fibre par division du faisceau lumineux d'entrée en deux ou plusieurs faisceaux de sortie. Ces coupleurs sont indispensables à la distribution des données dans un système de communication optique. Un exemple de ce système, utilisant deux coupleurs 2 × 2 en configuration bidirectionnelle, est schématisé dans la figure 3.

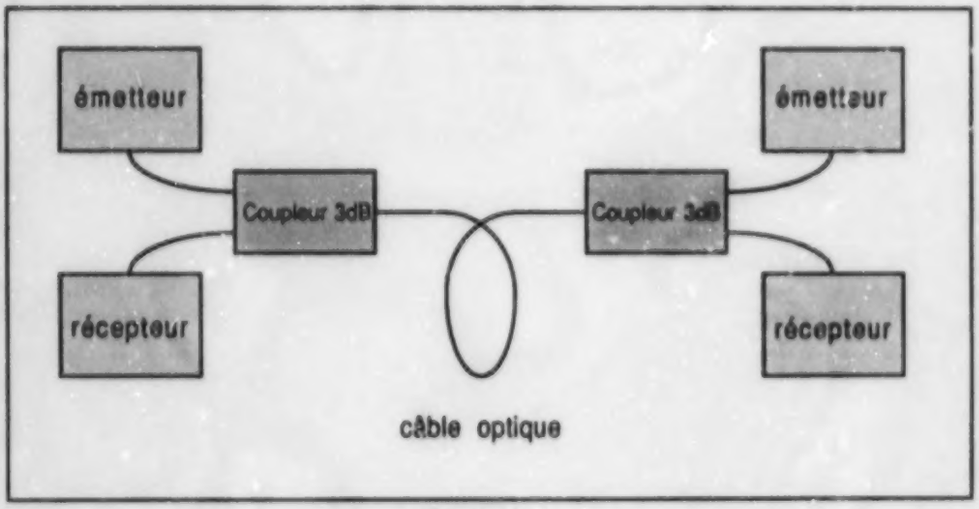


Figure 3

Système bidirectionnel de communication optique

Le principe de fonctionnement d'un coupleur bidirectionnel (illustré à la figure 4) repose sur une déformation localisée de la fibre principale de sorte que les rayons à fuite sont excités par couplage. De nos jours, les coupleurs sont presque tous réalisés par la méthode de fusion, tel qu'illustré dans la figure 5: on applique une certaine tension mécanique sur les fibres afin de les réunir, puis on les soumet à la chaleur d'un arc pour les faire fondre et les fusionner.

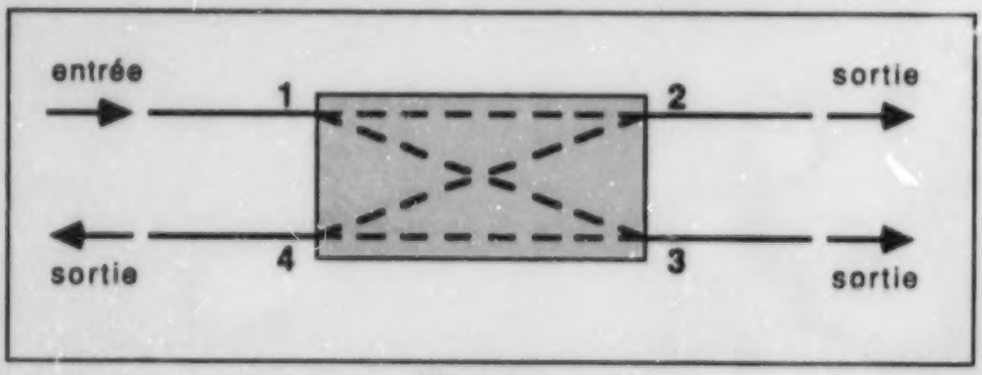


Figure 4

Schéma d'un coupleur bidirectionnel

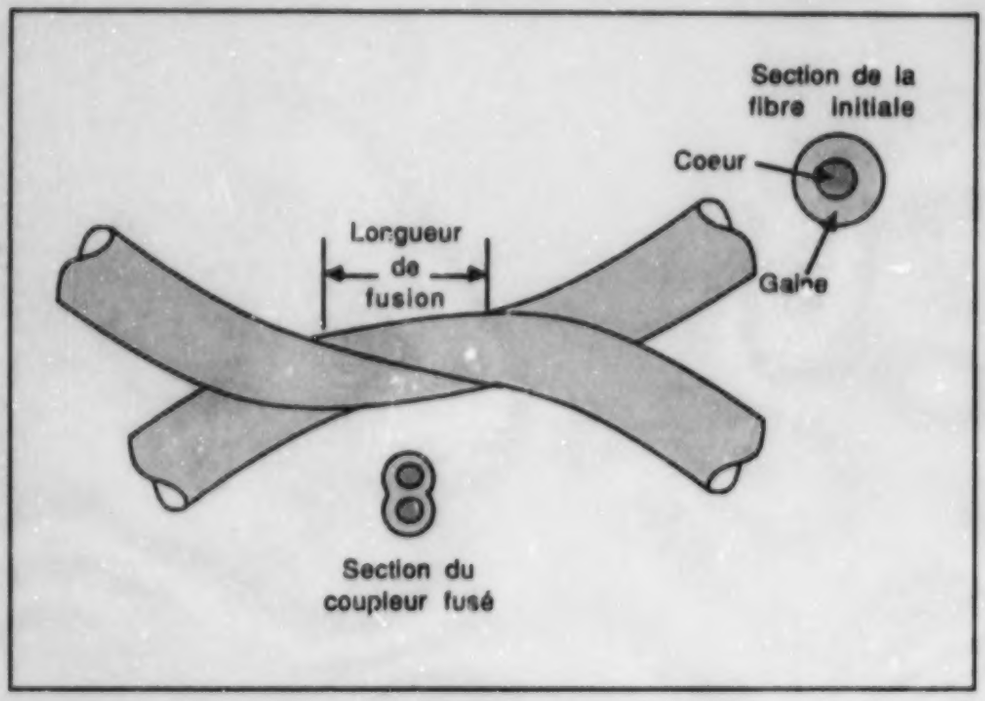


Figure 5

Fabrication d'un coupleur optique par la méthode de fusion

Les principaux paramètres (exprimés en dB) caractérisant un coupleur sont les suivants (en se référant à la figure 4):

1. Le coefficient de couplage:

$$C = 10 \text{ Log } \frac{P_1}{P_3} \qquad (C = 3 \text{ dB si } P_3 = \frac{1}{2} P_1)$$

2. La directivité:

$$D = 10 \text{ Log } \frac{P_1}{P_4}$$

3. Les pertes:

$$P = 10 \text{ Log} \left[\frac{P_1}{P_2 + P_3} \right]$$

EXPÉRIENCE

1. ÉTUDE DE COUPLAGE D'UN LASER He-Ne AVEC UNE FIBRE OPTIQUE

1. Faites le montage du système de mesure selon la figure 6.

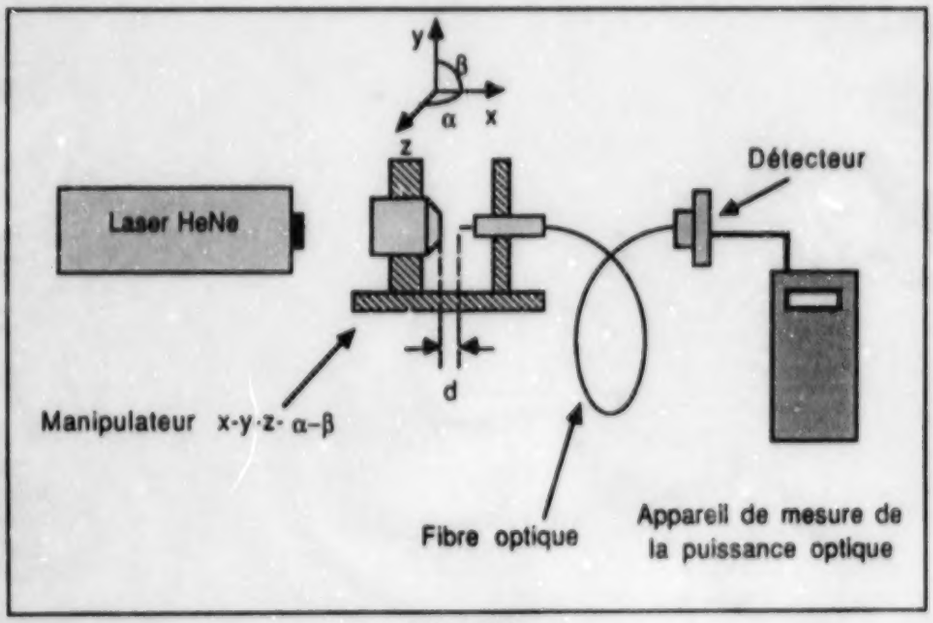


Figure 6

Schéma expérimental pour l'étude du couplage laser HeNe — fibre optique

2. Allumez le laser et vérifiez que le système fonctionne.

3. Mesurez directement l'intensité I_0 de la lumière à la sortie du laser.

4. En réglant le manipulateur XYZαβ, optimisez la quantité de lumière injectée dans la fibre multimode. Pour 3 réglages différents, calculez les pertes de couplage en supposant qu'il n'y a pas de pertes dans la fibre ni de pertes de couplage entre la fibre et le détecteur.

5. Répétez cette dernière étape (4.) en utilisant une fibre monomode.

6. Répétez de nouveau l'étape 4 à l'aide de lentilles cylindriques GRIN dans différentes configurations.

2. ÉTUDE D'UN COUPLEUR BIDIRECTIONNEL

1. Faites le montage du système de mesure selon la figure 7.

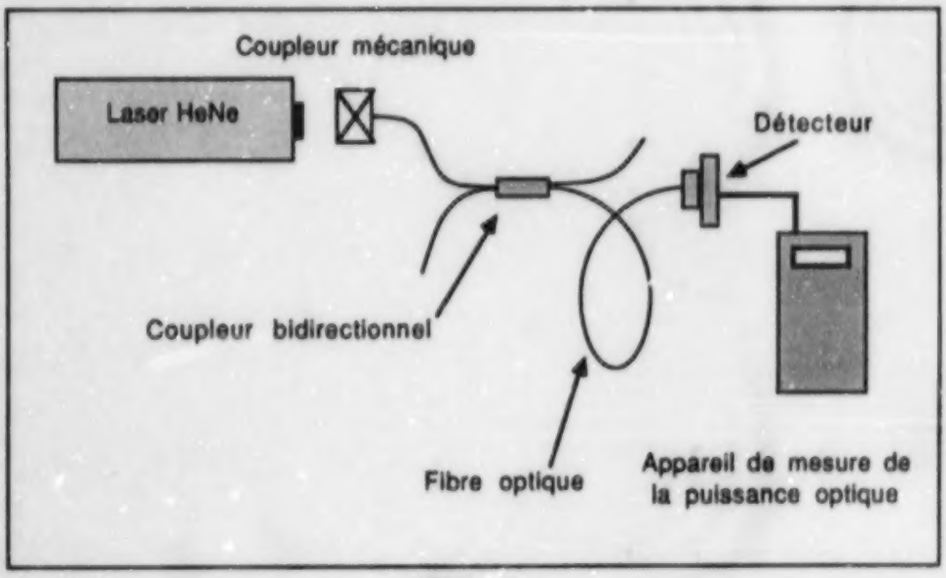


Figure 7

Schéma expérimental pour l'étude d'un coupleur bidirectionnel

2. Allumez le laser et vérifiez si le système fonctionne.

3. Mesurez directement l'intensité I_0 de la lumière qui sort du laser.

4. Optimisez la quantité de lumière injectée à l'aide du manipulateur XYZ $\alpha\beta$.

5. Mesurez le coefficient de couplage, la directivité et les pertes du coupleur bidirectionnel.

Questionnaire

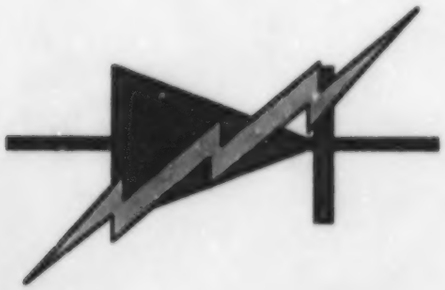
1. Discutez les facteurs qui influencent le couplage d'une source lumineuse avec une fibre optique.

2. Quelles méthodes pratiques sont utilisées pour réaliser le couplage?

3. Discutez des principaux paramètres des coupleurs bidirectionnels.

4. Quelles sont les applications pratiques de ces coupleurs?

LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE



Centre II

Expérience 6

Étude des signaux optiques à intensité variable (modulation mécanique)

ÉTUDE DES SIGNAUX OPTIQUES À INTENSITÉ VARIABLE (modulation « mécanique »)

Objectifs:

1. Étude de méthodes simples de modulation en intensité des signaux optiques.
2. Étude des méthodes élémentaires de traitement des signaux optiques.
3. Étude de la détection synchronique des signaux optiques.

Matériel:

1. Source de la lumière- laser He-Ne
2. Guide d'image
3. Chopper
4. Système de polarisation: analyseur et polariseur
5. Photodétecteur: photorésistance CdSe
6. Amplificateur Lock-in

INTRODUCTION

1. Modulation mécanique en intensité des signaux optiques

Pour que la lumière puisse agir comme véhicule de l'information, il est nécessaire de rendre modifiable (modulable) en fonction du signal de commande au moins un de ses paramètres caractéristiques. Dans le domaine de la métrologie, où le signal optique contient une information sur certains paramètres mesurés (sur la température par exemple), il est préférable de moduler et de détecter des signaux alternatifs plutôt que des signaux continus. Cette procédure permet de minimiser les effets parasites (surtout les bruits) et, en conséquence, de maximiser la précision des mesures effectives. Pour obtenir un signal optique dont l'intensité est une fonction périodique du temps, on peut par exemple couper mécaniquement le faisceau lumineux. Ce coupage se fait à l'aide d'un disque interrupteur perforé (chopper) commandé par un moteur électrique synchronique (voir figure 1 ci-dessous).

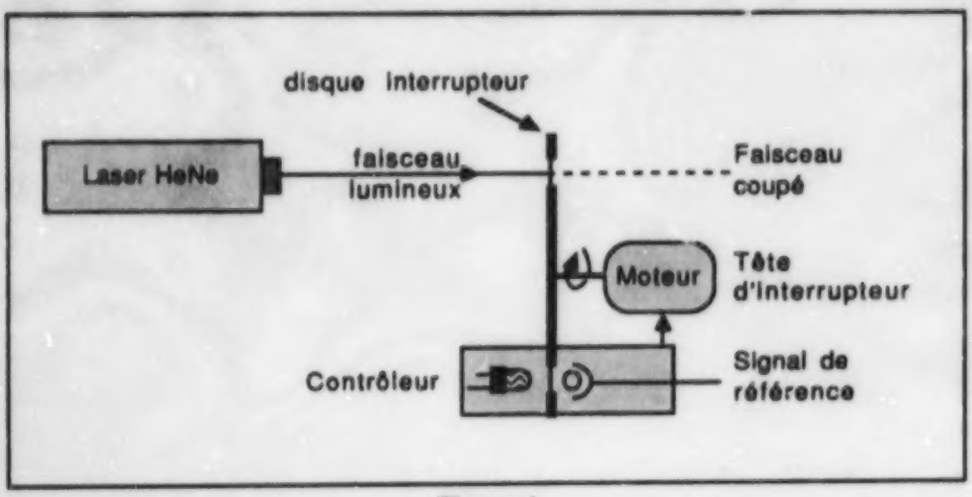


Figure 1

Modulation mécanique à l'aide d'un disque interrupteur perforé (chopper)

La vitesse et le nombre de perforations situées au bord du disque déterminent la fréquence avec laquelle la lumière est effectivement coupée. Pour modifier cette fréquence, on peut soit utiliser des disques ayant des nombres de perforations différents, soit changer les conditions d'alimentation du moteur. La modulation obtenue de cette manière peut être appelée « modulation mécanique". Bien que très lente (la fréquence maximale pouvant être ainsi atteinte ne dépassant pas quelques kHz), cette modulation n'en demeure pas moins simple et très utile dans un grand nombre d'applications.

2. Modulation en intensité à l'aide d'un système de polarisation

Lorsque le champ électromagnétique est une grandeur vectorielle, la notion de polarisation devient importante. Elle est déterminée par la direction du champ électrique de la lumière et, selon la figure 2, peut être linéaire, elliptique ou circulaire selon le déphasage entre les deux composantes E_x et E_y de ce champ.

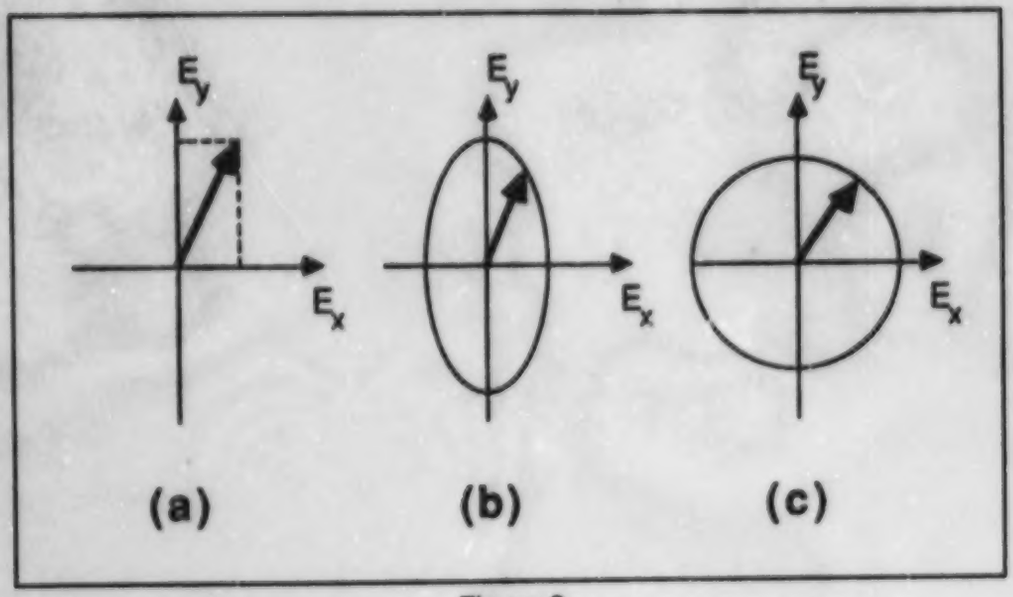


Figure 2

Types de polarisation de la lumière — a) linéaire, b) elliptique, c) circulaire

Un système de polarisation est constitué par 2 polariseurs: un polariseur principal **P** qui laisse passer uniquement une seule direction de la polarisation, ainsi qu'un analyseur **A** (voir figure 3). Si la direction de polarisation de l'analyseur est identique à celle du polariseur, l'intensité de la lumière sortant du système I_s est égale à l'intensité à l'entrée I_o (à condition évidemment de négliger les pertes dues à l'absorption et à la réflexion par les matériaux de l'analyseur et du polariseur). Dans le cas contraire, la relation entre les deux intensités I_s et I_o est donnée par la loi de Malus:

$$I_s = I_o \cos^2 \theta$$

où θ détermine l'angle entre les polarisations du polariseur et de l'analyseur. Il devient évident alors qu'on peut faire varier l'intensité de la lumière en modifiant tout simplement l'angle θ entre **P** et **A** dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de la lumière.

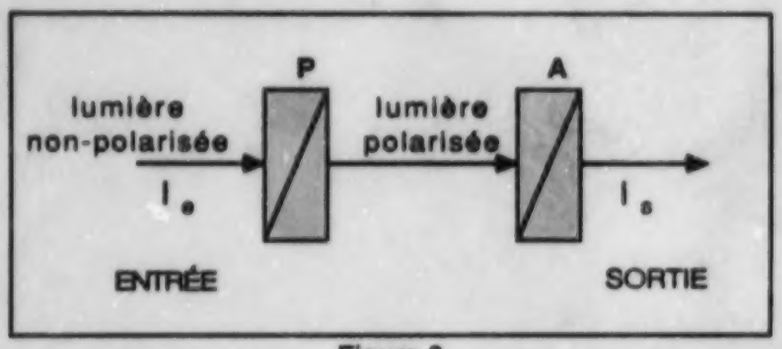


Figure 3

Système de polarisation de la lumière non-polarisée

3. La détection synchronique

Dans presque tous les domaines du génie, on envisage la nécessité de mesurer des signaux faibles, obscurcis par un haut niveau d'interférences. Le concept de la détection synchronique à l'aide d'un amplificateur « lock-in » (LIA : Lock-in-Amplifier) fournit

une solution à ce problème dans le domaine des mesures optiques. Cette méthode, très utile et très souvent utilisée, peut servir d'exemple pratique de la modulation mécanique du faisceau lumineux.

Un système de détection synchronique à l'aide d'un LIA et d'un chopper est illustré à la figure 4. Le chopper, contrôlé par un système de commande, module la lumière avec une fréquence f_r. Le signal de référence du chopper a une fréquence identique à f_r. Ce signal sert à synchroniser le LIA, ce qui lui permet de mesurer le signal à la sortie d'un détecteur dans une bande passante Δf très étroite autour de la fréquence f_r. De cette manière, tous les bruits caractérisés par des fréquences différentes de Δf sont pratiquement éliminés.

L'amplificateur LIA fonctionne donc comme un voltmètre AC avec une bande passante étroite correspondant à la fréquence du signal mesuré. À l'aide de la procédure présentée, on peut même détecter les signaux dont l'intensité est inférieure au niveau du bruit.

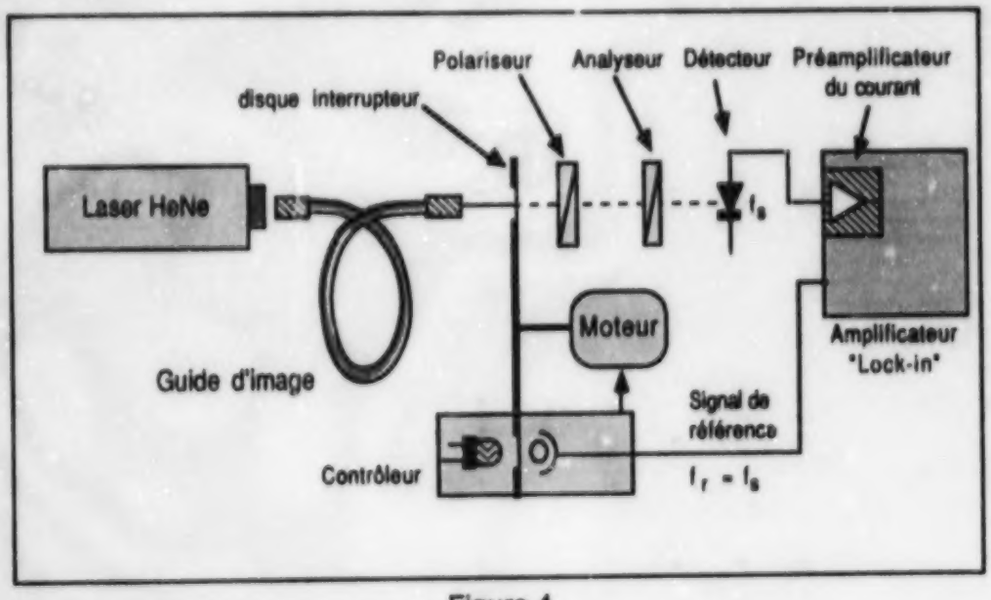


Figure 4

Système de mesure des signaux optiques à l'aide de la détection synchronique

EXPÉRIENCE

1. Faites le montage du système de mesure selon la figure 4.

2. Vérifiez si le système fonctionne et si le signal optique est enregistré par le LIA.

3. Mesurez une caractéristique de la sensibilité en fréquence du photodétecteur U(f), c'est-à-dire une dépendance de la tension enregistrée par le LIA en fonction de la fréquence de référence f_r déterminée par le contrôleur du chopper (mesurez au moins 15 points).

4. Faites le graphique de U(f).

5. Choisissez une fréquence de travail correspondant à une sensibilité maximale du détecteur. En utilisant le LIA, mesurez les niveaux du signal optique correspondant aux différents angles entre les deux polariseurs P et A. Lisez cet angle à l'aide d'une échelle sur l'analyseur A.

6. Faites le graphique de $U(\alpha)$, où α est l'angle entre les deux directions de polarisation, déterminées par P et A.

7. Comparez une caractéristique mesurée avec les lois de Malus (graphiquement et analytiquement).

Questionnaire

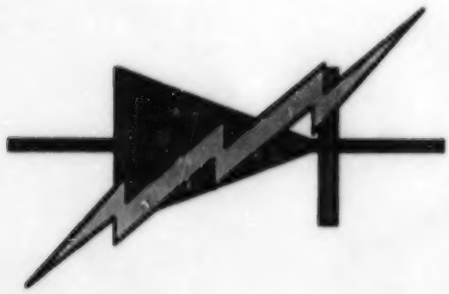
1. Le photodétecteur CdSe est-il capable d'enregistrer les signaux caractérisés par des fréquences de l'ordre de 1 à 2 kHz ?

2. L'amplificateur « Lock-in » (LIA) peut-il fonctionner sans signal de référence?

3. La caractéristique U(α) sera-t-elle modifiée si on enregistre les angles du polariseur P au lieu de ceux de l'analyseur?

4. Peut-on remplacer le laser He-Ne dans le système de mesure illustré par la figure 4, par une source standard de lumière, comme une ampoule par exemple?

LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE



Centre II

Expérience 7

Modulation acousto-optique de la lumière

MODULATION ACOUSTO-OPTIQUE DE LA LUMIÈRE

Objectifs:

1. Apprentissage des principes de base de la modulation acousto-optique.
2. Étude du fonctionnement d'un système de modulation acousto-optique.

Matériel:

1. Source de la lumière-laser He-Ne
2. Guide d'images
3. Modulateur acousto-optique
4. Contrôleur pour le modulateur
5. Générateur de signaux
6. Manipulateurs et équipement de positionnement optique
7. Écran avec échelle pour mesurer la déflexion du faisceau lumineux

INTRODUCTION

1. Généralités

Le fonctionnement d'un système de transmission par fibre optique suppose que l'on puisse « imprimer » l'information à transmettre sur un faisceau lumineux qui ne servira que de porteur de cette information. Ce processus peut être réalisé à l'aide d'une technique dite de modulation.

Le modulateur est alors un dispositif (ou un système) capable de modifier les paramètres de la lumière en fonction d'un signal de commande. Les paramètres modifiables de la lumière sont assez nombreux: amplitude (intensité), polarisation, direction de propagation, fréquence, phase, répartition de modes, etc... Ils peuvent être changés à l'aide de signaux électriques, acoustiques, magnétiques, mécaniques ou optiques.

Toutes ces méthodes de modulation peuvent être classifiées en deux groupes (voir figure 1): la modulation directe, dont l'exemple type est un laser à semiconducteur où la tension appliquée influence directement l'intensité de la lumière à la sortie; et la modulation externe, où, à l'aide d'un dispositif externe, on module la lumière émise par une source non-modulable telle qu'un laser. La modulation acousto-optique étudiée dans cet exercice est un exemple de cette dernière catégorie de modulation.

2. Modulation acousto-optique

Le principe physique de la modulation acousto-optique est illustré à la figure 2. On excite une onde acoustique dans un milieu à l'aide d'impulsions électriques appliquées sur un transducteur piézoélectrique. Cette onde, soit progressive, soit stationnaire, provoque des déformations locales qui entraînent des variations de l'indice de réfraction du matériau. Lorsqu'elles sont périodiques, ces variations constituent un réseau de diffraction pour le faisceau lumineux incident. En général, l'angle d'incidence de ce faisceau peut être arbitraire.

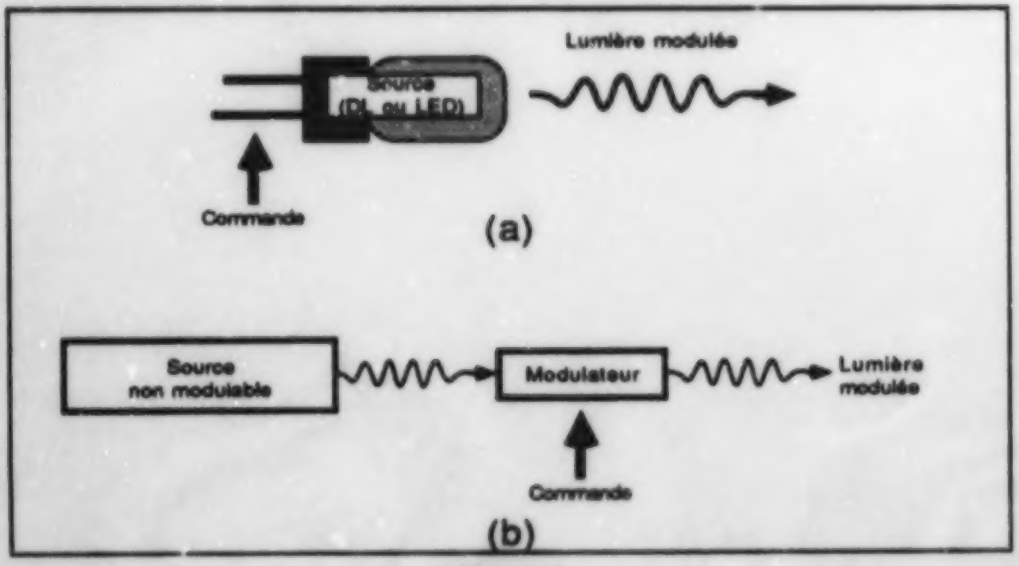


Figure 1

Les deux types de modulation:

a) modulation directe; b) modulation externe

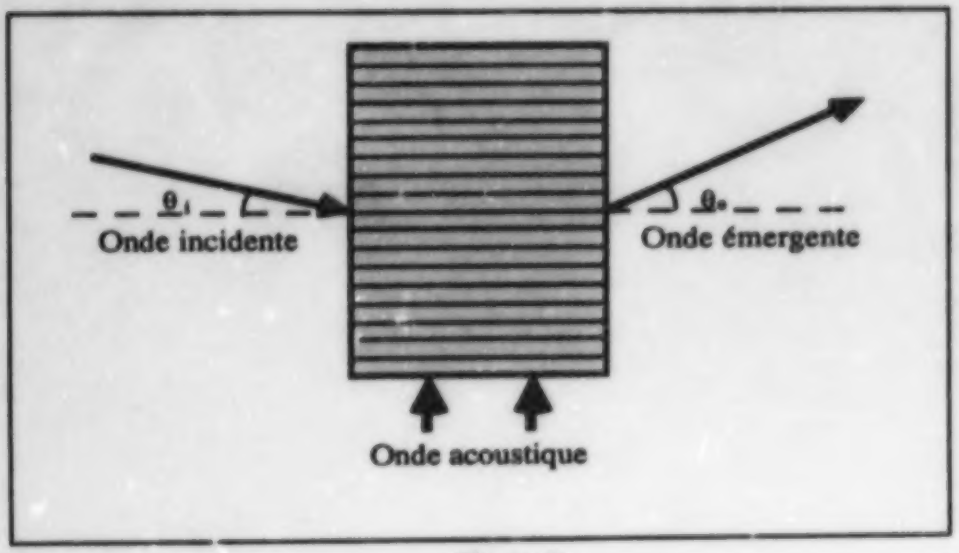


Figure 2

Principe de la modulation acousto-optique

En pratique, les directions de propagation d'une onde acoustique et de la lumière sont le plus souvent mutuellement perpendiculaires. Cette situation correspond à la diffraction de Bragg, pour laquelle on peut écrire:

$$n \cdot \sin \theta = \lambda_0 / n\Lambda$$

où λ_0 = longueur d'onde de la lumière
Λ = longueur de l'onde acoustique
θ = angle de déflexion
n = indice de réfraction

On voit alors que l'angle de déflexion dépend de la longueur d'onde acoustique Λ. Cette longueur d'onde acoustique peut être calculée selon la formule suivante:

$$f = v / \Lambda$$

où f = fréquence acoustique,
v = la vitesse du son dans le matériau

La déviation de la lumière peut donc être obtenue par l'équation suivante, en fonction de la fréquence acoustique f:

$$\sin \theta = \lambda_0 \cdot f / (n \cdot v)$$

Pour commander la déviation de la lumière émergente et réaliser pratiquement un modulateur acousto-optique, il faudra faire varier la fréquence f et générer ainsi à l'intérieur du matériau un réseau à pas variable.

Dans les applications de ce type de déflecteurs, on est limité par le nombre maximal de directions séparables. Si L désigne la dimension longitudinale du faisceau d'ultrasons, ce nombre est donné par l'équation suivante:

$$N = \tau \cdot \Delta f$$

$$= (L/v) \cdot \Delta f$$

où Δf = largeur disponible de la bande acoustique

$\tau = L/v =$ temps de réponse qui correspond au temps d'établissement du régime acoustique dans la totalité du matériau.

EXPÉRIENCE

1. Faites le montage du système de mesure selon la figure 3.

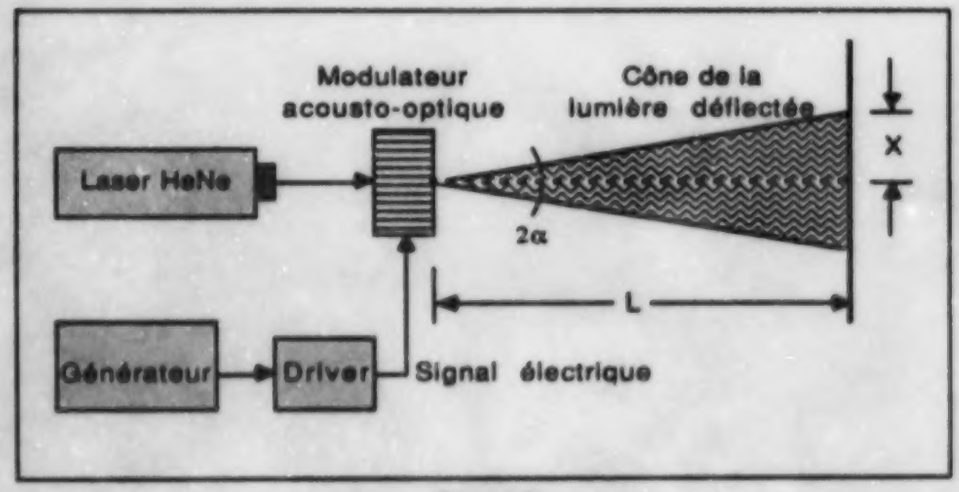


Figure 3

Montage du système expérimental pour l'étude de la modulation acousto-optique de la lumière

2. Vérifiez si le système fonctionne et si le signal optique est dévié pour une certaine fréquence f_o d'une onde acoustique excitée dans le modulateur.

3. Observez l'influence de la fréquence du générateur, dans la région 1Hz-20 kHz, sur la déflexion du rayon lumineux. Interprétez cette influence.

4. Mesurez sur l'écran les 5 distances de déflexion X obtenues pour 5 fréquences des ondes acoustiques excitées. En mesurant la distance entre le modulateur et l'écran Y, déterminez les angles de déflexion selon l'équation suivante:

$$\text{tg } \theta = X/Y$$

5. Pour une fréquence acoustique choisie, calculez la vitesse du son dans le matériau du modulateur. Posez λ_0 = 633 nm et n = 1,5. Déterminez alors le temps de réponse du système.

6. Sachant que Δf = 40 MHz, déterminez le nombre maximal de directions séparables, en utilisant pour les calculs le résultat obtenu au point 5 et en mesurant la dimension longitudinale du modulateur.

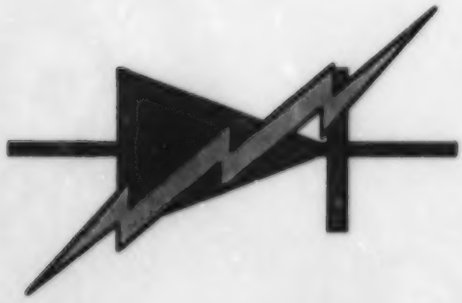
Questionnaire

1. Expliquez le phénomène de la modulation acousto-optique de la lumière.

2. Comment peut-on augmenter l'angle de déflexion acousto-optique?

3. Quels sont les paramètres qui influencent le nombre de directions séparables à l'aide d'un déflecteur acousto-optique?

LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE



Centre II

Expérience 8

Les épissures fixes

LES ÉPISSURES FIXES

Objectifs:

1. Étude du fonctionnement d'un dispositif d'épissure par fusion.
2. Entrainer l'élève à réaliser des épissures fixes.
3. Étude des pertes d'intensité dues aux épissures.

Matériel:

1. Source de lumière-laser He-Ne
2. Détecteur de puissance optique (Wattmètre)
3. Appareil d'épissure par fusion
4. Outil pour le coupage des fibres optiques
5. Nécessaire pour la préparation de la fibre:
   - Solvant pour dissoudre la gaine protectrice
   - Acétone
   - Papiers mouchoirs

INTRODUCTION

L'épissure fixe est la jonction permanente de deux fibres optiques. On fait des épissures pour réparer des fibres cassées ou bien pour relier des composantes utilisant la technologie des fibres optiques. L'épissure fixe est le type d'épissure qui n'entraîne qu'une perte minimale de l'intensité du signal optique. Elle s'effectue par la fusion, à l'aide d'un arc, des deux extrémités de fibres qu'on désire réunir.

Il va sans dire que la qualité de l'épissure est d'une importance primordiale. Une épissure de mauvaise qualité provoquera la fuite d'une fraction importante de la lumière hors de la fibre ainsi que des réflexions vers la source. Dans cet exercice, on verra quelques-unes des causes de pertes de puissances dues aux épissures, une technique utilisée pour couper la fibre et, enfin, une description de l'appareil servant à réaliser les épissures fixes et sa procédure d'utilisation.

1. Les causes des pertes de puissance dans les épissures

On caractérise les causes des pertes de puissances dans les épissures en deux classes: intrinsèque et extrinsèque. Les causes intrinsèques sont reliées aux caractéristiques des fibres à relier. Elles sont présentes lorsqu'on relie des fibres dont les diamètres de coeurs, les ouvertures numériques ou encore les profils d'indice de réfraction sont différents (ce dernier cas ne s'applique qu'aux fibres à gradient d'indice).

Il est à noter que le passage de la lumière d'une fibre de petit diamètre de coeur à une autre de diamètre de coeur plus grand ne causera pas une grande perte de puissance, alors qu'en sens inverse, d'importantes pertes se produiront. De même, le passage de la lumière d'une fibre de faible ouverture numérique (NA) à une fibre de NA plus grande ne causera pas de perte importante de puissance, ce qui n'est pas le cas réciproquement.

Les causes extrinsèques des pertes de puissance lumineuse sont reliées à la qualité des épissures. Il peut s'agir d'une séparation des noyaux des fibres, d'une mauvaise coupure

ou encore d'un mauvais alignement angulaire ou axial des fibres. Ce sont ces pertes qu'on cherchera à minimiser dans cette expérience.

La figure suivante montre des schémas représentant les sources de pertes de puissance qui viennent d'être mentionnées:

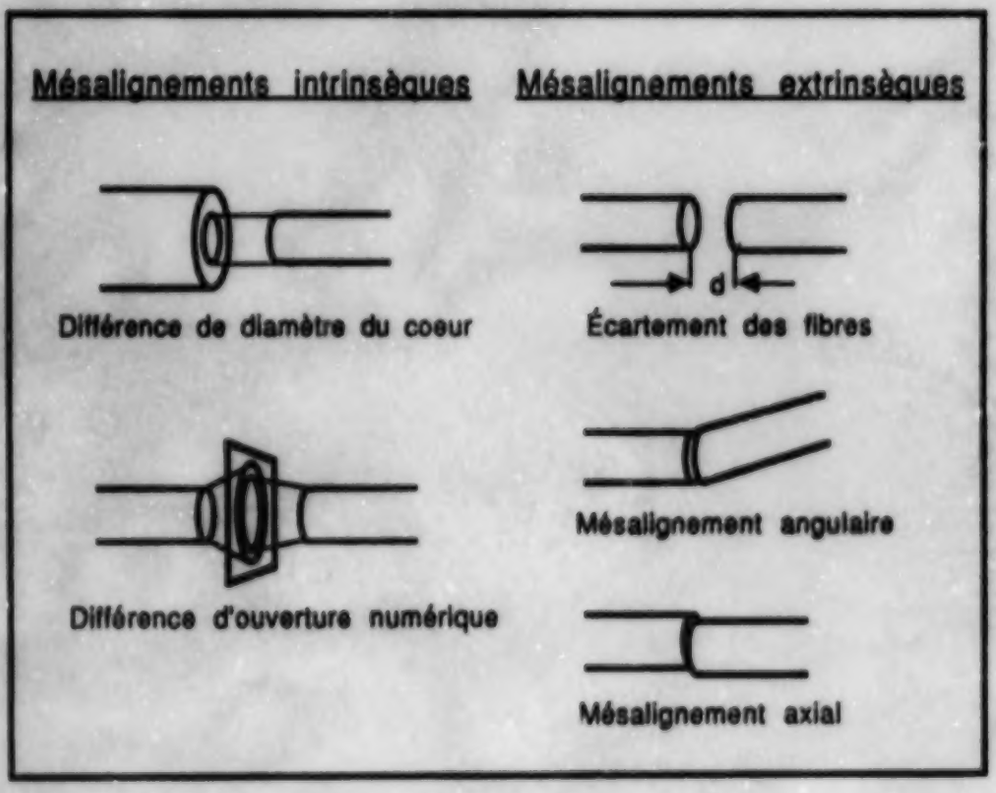


Figure 1

Exemples de configurations d'épissures conduisant à des pertes d'intensité.

2. Le clivage de la fibre

L'obtention d'une cassure droite et nette de la fibre est la première étape à franchir pour l'obtention d'une épissure performante. La procédure utilisée pour effectuer cette cassure consiste à provoquer une faiblesse localisée dans la fibre en frappant celle-ci avec un outil dur et en tirant sur la fibre de façon à la casser à l'endroit où se situe la faiblesse. On appelle cette technique « *clivage* », car la cassure se propage le long d'un plan de contrainte. La figure suivante montre comment le clivage se produit lorsque la contrainte est appliquée en pliant la fibre (A) ou bien en l'étirant (B).

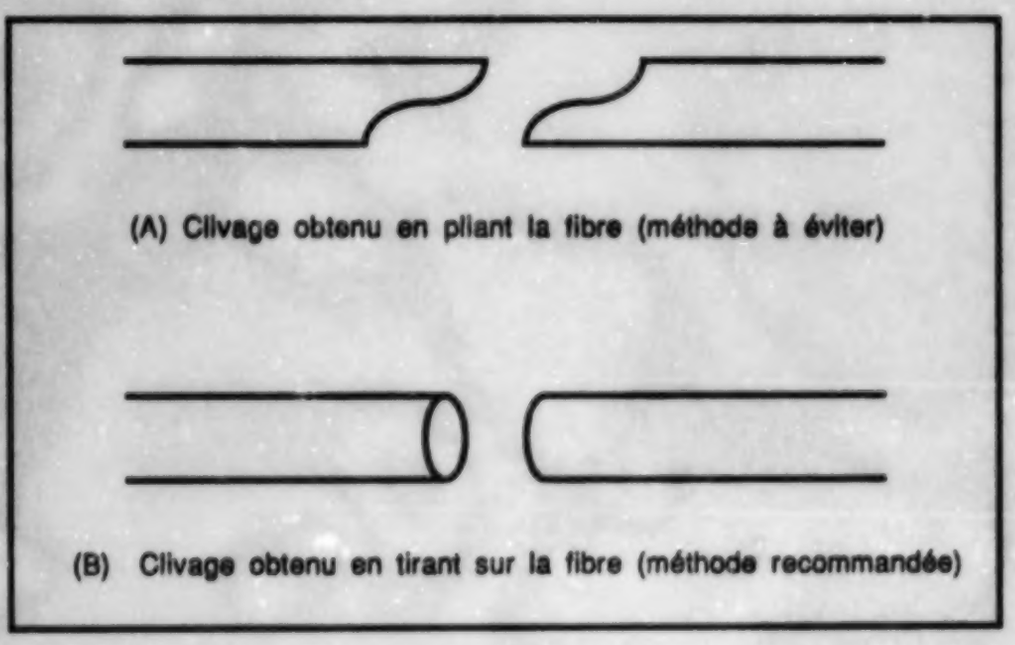


Figure 2

Forme du clivage obtenu en pliant la fibre ou en l'étirant.

Lorsque la fibre est cassée par pliage, un des côtés de la fibre est étiré (le côté extérieur de la boucle) alors que l'autre côté (le côté intérieur de la boucle) est compressé. Il en résulte une contrainte non uniforme, donc un clivage courbé. Par contre, en étirant la fibre sans la plier, la contrainte est perpendiculaire à l'axe de la fibre et la cassure obtenue est droite.

3. Description de l'appareil servant à réaliser des épissures fixes

L'appareil utilisé pour effectuer des épissures est constitué d'un microscope muni de deux plateaux servant à maintenir les fibres à réunir, de verniers pour l'alignement des fibres, ainsi que de deux électrodes pour produire l'arc électrique qui soudera les fibres. Un schéma de cet appareil est présenté dans la figure 3.

La fibre est maintenue en place par deux systèmes. Une fente est creusée dans les plateaux latéraux et une succion permet de retenir la fibre dans cette fente. Ce système à succion facilite grandement l'installation de la fibre dans la fente. Il s'enclenche automatiquement lorsqu'on allume la lumière. Un second système, mécanique, composé de coussins pouvant exercer une pression sur la fibre permet de la maintenir plus fermement. Ce second système doit être enclenché avant d'utiliser les verniers pour l'alignement fin des fibres.

Il y a deux séries de commandes servant à contrôler les paramètres électriques de l'arc: *prefuse* (préfusion) et *fuse* (fusion). La préfusion sert à la préparation de la fibre avant la fusion. On s'en sert pour nettoyer la fibre (l'arc pouvant vaporiser les poussières et les impuretés se trouvant sur la fibre) ainsi que pour enlever les légères aspérités à la surface de la fibre résultant du clivage. L'arc de préfusion est court en temps et de faible courant. On utilisera typiquement un arc de 0,2 s et un courant de 10 mA.

La deuxième série de commandes sert à contrôler la fusion des deux fibres. On utilisera ici un arc durant environ 2,5 s et un courant de 19 mA. L'arc est amorcé alors que les fibres à joindre sont distantes de quelques micromètres. Un système de déplacement piézo-électrique peut être programmé pour faire avancer automatiquement les fibres de quelques micromètres durant la fusion afin de les joindre.

L'alignement des fibres

La procédure suivante doit être suivie pour l'alignement des fibres avant la fusion:

1. Faites le focus sur l'extrémité des électrodes.
2. Utilisez les verniers Z pour rapprocher les fibres sans toutefois qu'elles se touchent.
3. À l'aide des verniers X et Y, amenez les fibres au focus et centrez-les entre les deux électrodes.
4. Tournez le miroir afin d'observer les fibres latéralement. Utilisez les verniers Y pour amener les fibres à la hauteur de l'électrode. Alignez précisément les fibres.
5. Ramenez le miroir en position normale (de façon à voir les deux électrodes) et corrigez l'alignement en utilisant les verniers X seulement.

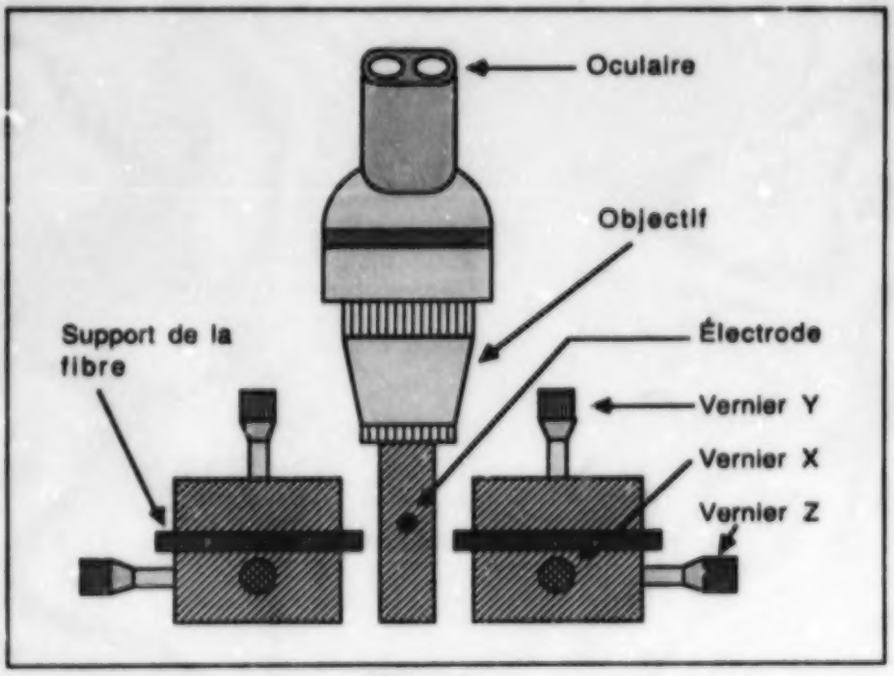


Figure 3a

Coupe frontale de l'appareil servant à réaliser des épissures fixes

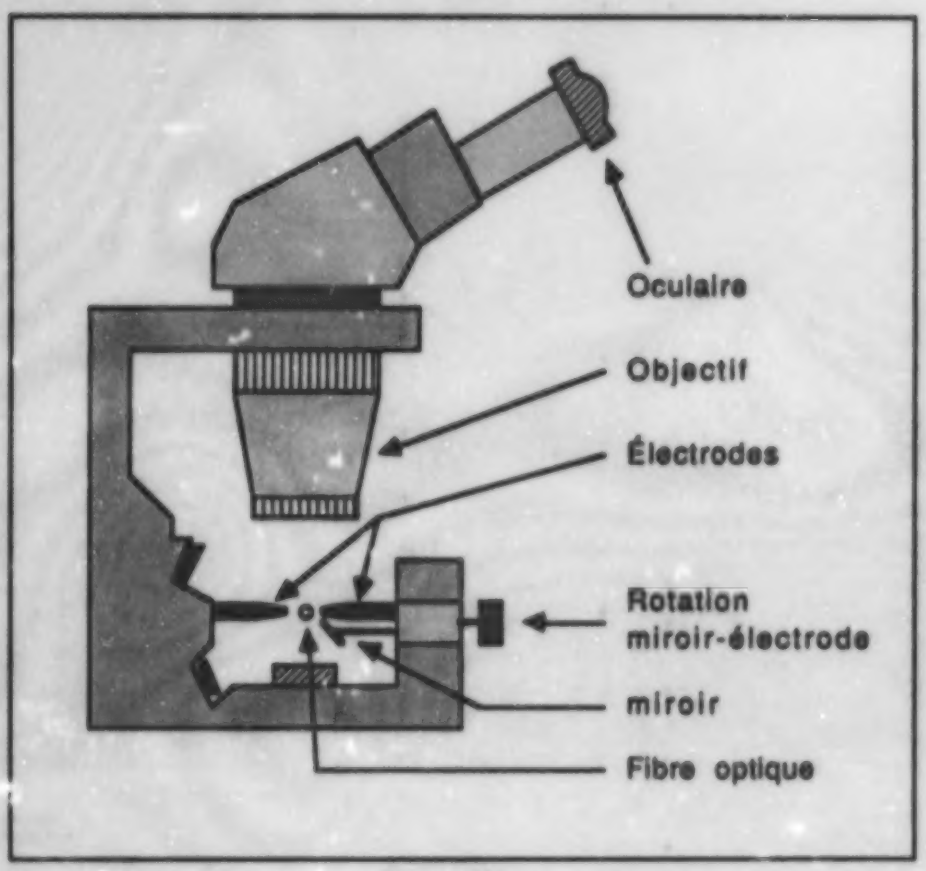


Figure 3b

Coupe latérale de l'appareil servant à réaliser des épissures fixes

EXPÉRIENCE

1. Faites le montage représenté sur la figure ci-dessous:

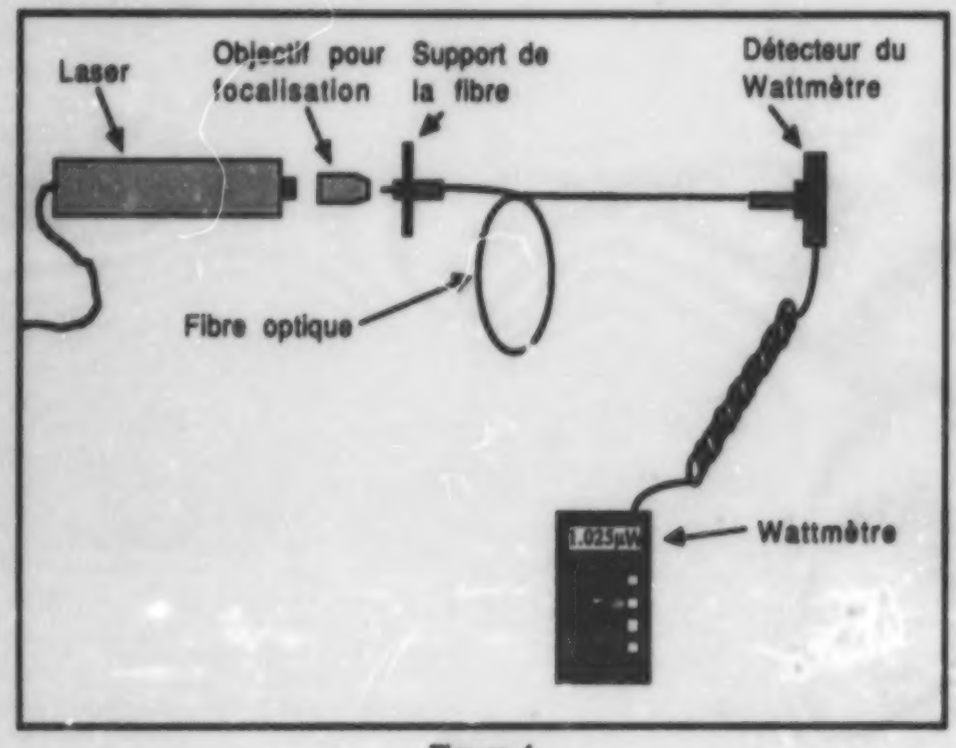


Figure 4

Schéma du montage servant à l'étude des épissures fixes

2. Maximisez la puissance lue au wattmètre en déplaçant la fibre à l'aide des verniers du support de la fibre. Notez la puissance obtenue.

3. Coupez la fibre à 1 mètre environ du wattmètre. Enlevez la gaine protectrice aux deux extrémités sur une longueur de quelques centimètres (vous trempez les bouts de la fibre dans le solvant pendant 1 minute, essuyez à l'aide d'un mouchoir et lavez à l'acétone).

4. Installez la fibre sur l'appareil à épissures et observez la brisure de la fibre. Faites-en un schéma.

5. Faites maintenant une coupure nette de la fibre à l'aide de l'outil prévu à cette fin. Observez la coupure et recommencez si nécessaire jusqu'à l'obtention d'une cassure nette et droite.

Utilisation de l'appareil à épissures:

6. Placez le commutateur « *fiber feed* » à « *manual* ».

7. Alignez les fibres (utilisez la procédure décrite en page 6). Rapprochez les fibres à une centaine de micromètres l'une de l'autre. L'image au microscope devrait ressembler au schéma (B) de la figure 2.

8. **Préfusion:** Réglez les contrôles comme suit:

   Ramp time: 0,02 s
   Arc time: 0,20 s
   Arc current: 10 mA

   Placez le couvercle de sécurité en plastique entre l'objectif et la fibre (l'arc ne se produit que si ce couvercle est en place). Appuyez sur le bouton « *PREFUSE* ».

   Le rôle de la préfusion est principalement de nettoyer la fibre. Répétez l'opération si vous observez des impuretés à la surface. Vous pouvez augmenter légèrement le courant ou la durée de l'arc, mais assurez-vous que l'arc n'affecte pas la forme de la fibre.

9. Revérifiez l'alignement des fibres en utilisant le miroir et les verniers X et Y. L'arc de préfusion a pu déplacer les fibres. Rapprochez les fibres au maximum et optimisez le signal lu au wattmètre en utilisant encore une fois les verniers X et Y. Remarquez que le signal est maximum quand l'alignement des fibres est parfait. Notez la puissance indiquée au wattmètre.

10. **Fusion: Réglez les paramètres électriques de l'arc comme suit:**

Ramp time:	0,12 s
Arc time:	2,50 s
Arc current:	19 mA.

11. **Réglez les paramètres de déplacement automatique comme suit:**

Fiber advance:	25 µm
Delay:	0,30 s
Time:	0,30 s

12. **Placez le commutateur « *Fiber Feed* » à « *Auto* ». Vous pourrez observer que les fibres s'écartent d'environ 10 µm. En utilisant les contrôles piézo-électriques X et Y (boutons noirs), optimisez le signal lu au wattmètre. Notez la puissance indiquée par le wattmètre.**

13. **Observez les fibres au microscope et appuyez sur le bouton « *FUSE* ». Notez la puissance indiquée par le wattmètre.**

14. **Répétez l'expérience au moins 5 fois. Reportez vos résultats dans le tableau suivant et calculez l'atténuation produite par chacune de vos épissures (en décibels).**

Tableau des résultats

	Puissance lue au wattmètre (µW)					
	Expérience numéro					
	1	2	3	4	5	6
Puiss. avant coupure (étape 2):						
Ajustement grossier (étape 9):						
Ajustement piézo (étape 12):						
Après fusion (étape 13):						

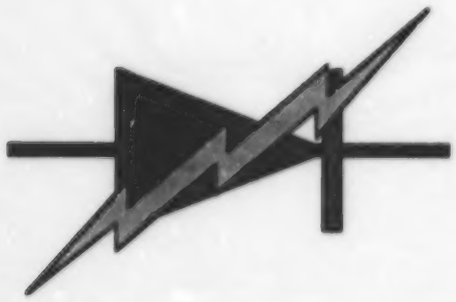
Atténuation:

Expérience 1: _____ dB
Expérience 2: _____ dB
Expérience 3: _____ dB
Expérience 4: _____ dB
Expérience 5: _____ dB
Expérience 6: _____ dB

Note:

Atténuation (dB) = - 10 · log(Puissance après fusion / Puissance avant coupure)

LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE



Centre III

Expérience 9

Système numérique de transmission des signaux optiques infrarouges

SYSTÈME NUMÉRIQUE DE TRANSMISSION DES SIGNAUX OPTIQUES EN INFRAROUGE

Objectifs:

1. Simulation des canaux temporels dans le système de multiplexage temporel (TDM - Time Division Multiplexing), réalisée à l'aide de deux systèmes de transmission par fibres optiques

2. Tests de la qualité du couplage des cbles optiques de communication à l'aide des sources et des détecteurs de la lumière

Matériel:

1. Deux systèmes électroniques de simulation munis de :

   2 diodes DEL fonctionnant à la longueur d'onde $\lambda = 0,8$ nm

   4 paires de connecteurs (2 x fibre / DEL et 2 x fibre / photodétecteur)

2. Oscilloscope

3. Alimentation TTL +5V DC

4. Cbles BNC

Exp. 9: Système numérique de transmission des signaux optiques en infrarouge

INTRODUCTION

Pour pouvoir transmettre l'information à l'aide de fibres optiques, il faut moduler la lumière émise par le transmetteur selon le signal de commande - souce d'information. La figure 1 illustre un système de communication simple qui utilise ce procédé pour effectuer la transmission.

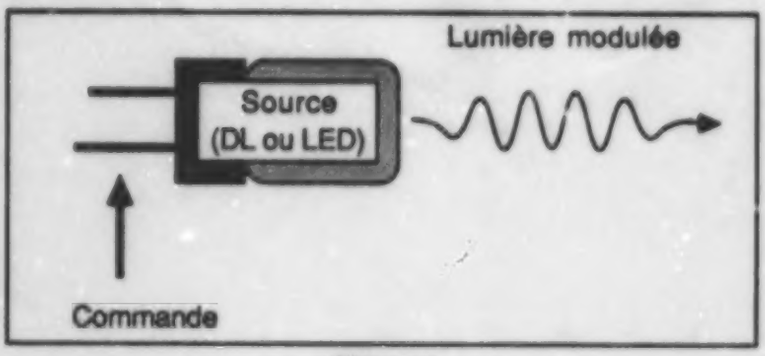


Figure 1

Principe de fonctionnement d'un système de modulation de la lumière

Des deux principaux types de modulation, soit la modulation numérique et la modulation analogique, on préfère le premier. En effet, on privilégie l'encodage de l'information sous forme de signal numérique pour les raisons suivantes:

1) facilité de commutation rapide des diodes DL et DEL

2) absence de distortions non linéaires des caractéristiques « puissance optique » et « courant » des diodes DL et DEL

3) minimisation du taux d'erreurs de bits (BER - Bit Error Rate)

4) compatibilité avec les systèmes électroniques

5) facilité de resynchronisation et de remise en forme des signaux numériques

La transmission numérique des signaux optiques est basée sur la conversion de signaux analogiques en un train d'impulsions numériques. Pour chaque canal téléphonique, la gamme des fréquences audibles est comprise entre 300 et 3400 Hz. Chaque canal est normalement échantillonné à une fréquence de 8 kHz et chaque échantillon est converti en un octet de 8 bits. Le premier bit donne la parité du signal, tandis que les sept autres en précisent la grandeur sur une échelle logarithmique. Dans ce mode de fonctionnement, chaque canal de transmission de voix exige une vitesse de transmission de 64 kb/s. Un système de multiplexage temporel comportant 24 canaux de voix nécessitera donc une vitesse de transmission 24 fois supérieure, soit 1,54 Mb/s. Le tableau 1 présente les normes des systèmes de télécommunication numérique utilisés en Amérique du Nord et en Europe.

	Systèmes Bell		Systèmes européens	
Classe	Nbre de canaux	Débit [kb/s]	Nbre de canaux	Débit [kb/s]
T1	24	1 544	32	2 048
T2	96	6 312	120	8 448
T3	672	46 304	480	34 368
T4	4032	274 175	1920	139 364

Tableau 1

Les fibres optiques possèdent d'excellentes propriétés de transmission, qui dépassent de beaucoup les capacités actuelles des diodes DL, DEL et des photodétecteurs. Il est maintenant possible de parvenir à une bande passante atteignant 4 Gb/s.

Pour réaliser pratiquement un système tel que le T4 avec 4032 canaux d'information, on utilise la méthode de multiplexage temporel: les informations incluses dans les 4 canaux

Exp. 9: Système numérique de transmission des signaux optiques en infrarouge

temporels sont envoyées dans des intervalles de temps consécutifs. Ces intervalles sont identiques et se répètent à une fréquence de synchronisation précise tel qu'illustré par la figure 2:

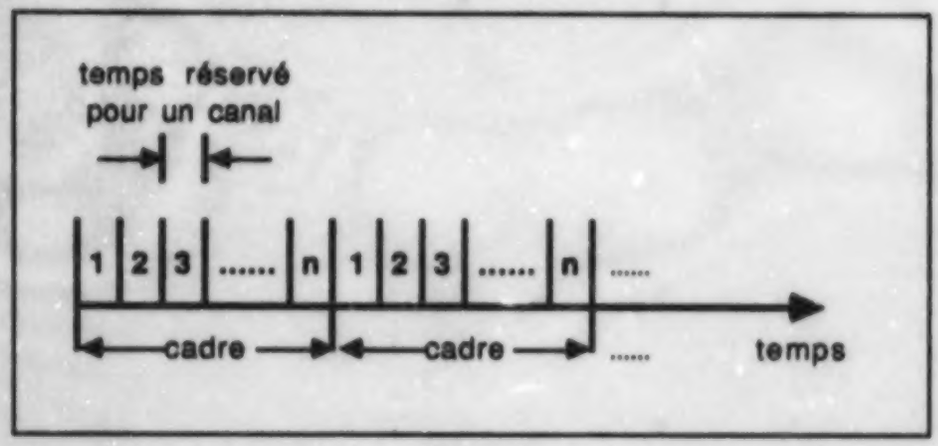


Figure 2

Diagramme temporel pour les systèmes TDM (Time Division Multiplexing)

On peut accroître la capacité d'information d'un tel système en:

- augmentant le nombre de bits par une diminution de la durée des impulsions individuelles dans un canal;
- augmentant la durée de cadre et, par là même, le nombre de canaux.

Ces deux méthodes restent toutefois assez limitées.

Le principal avantage du système TDM réside en ce qu'il crée la possibilité d'envoyer des informations provenant de différentes sources de lumière par une seule ligne de transmission optique, tel que le montre la figure 3.

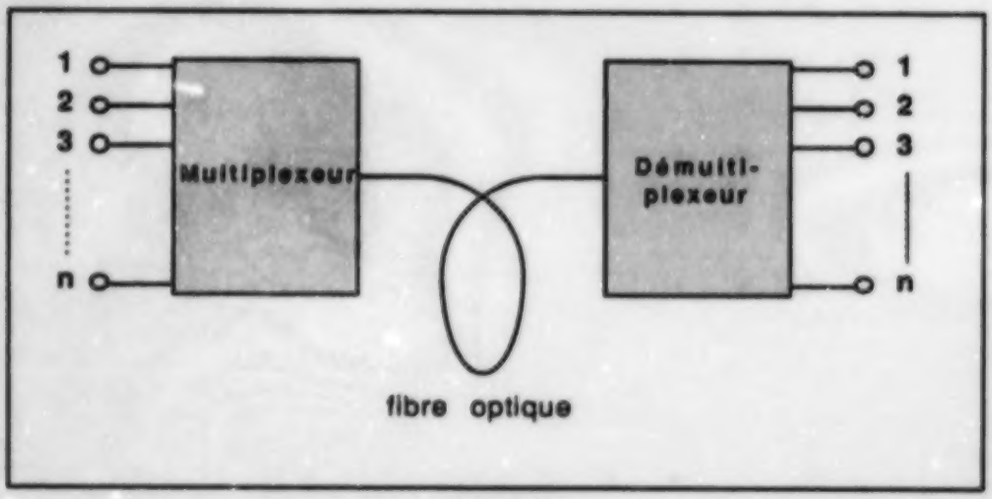


Figure 3

Exemple d'un système de multiplexage TDM: n canaux d'information sont transmis par une seule fibre.

Le système étudié dans cette expérience fonctionne à une longueur d'onde de 820 nm, de sorte qu'il n'occasionnera que de faibles pertes d'énergie dans la fibre (voir aussi Expérience 4). La fibre utilisée est de type multimode 125 / 50 µm (gaine = 125 µm, coeur = 50 µm). Dans le cas de fibres dont le diamètre du cœur est supérieur à 50 µm, il risque d'y avoir une augmentation du degré de distorsion des impulsions, ce qui peut entraîner une détérioration de la capacité de transmission d'information du système. Pour assurer un bon couplage entre la fibre, la source et le détecteur, on utilise un dispositif et des fibres connectorisés. Cette procédure permettra d'éviter les pertes de mésalignement schématisées dans la figure 4.

La simulation d'un système TDM est réalisée pratiquement à l'aide deux lignes de transmission unidirectionnelles, tel qu'illustré dans la figure 7. Chacun des modules A et B comporte un transmetteur et un récepteur. Le transmetteur A est relié à l'aide d'un câble optique au récepteur B, de même que le transmetteur B avec le récepteur A. Chaque ligne peut véhiculer séparément les différents trains d'impulsions, qui simulent le fonctionnement du système TDM. Les circuits électroniques du système sont illustrés dans les figures 5 et 6.

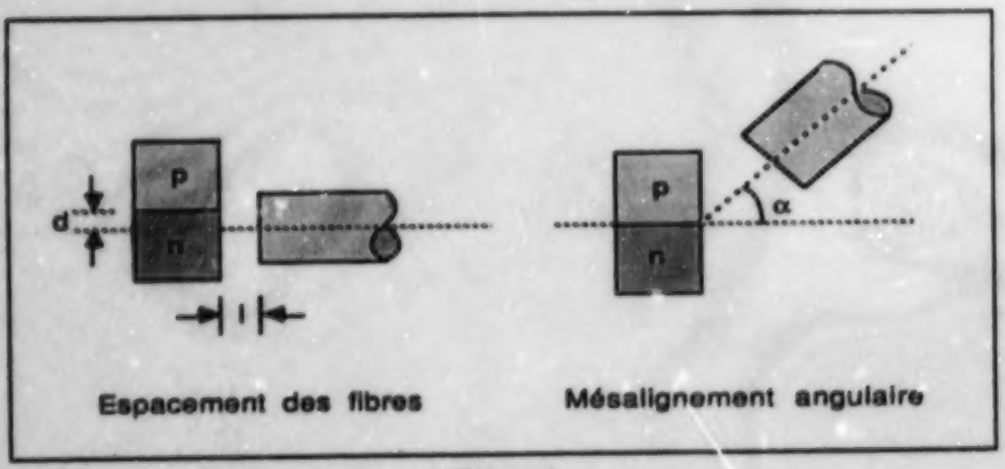


Figure 4

Exemples de mésalignements: espacement des fibres et mésalignement angulaire

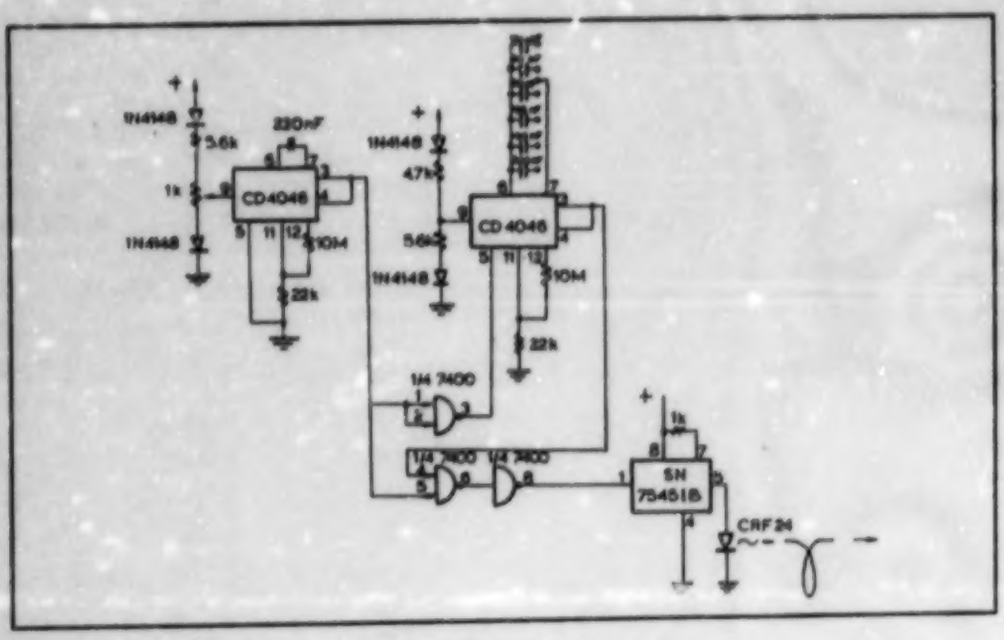


Figure 5

Schéma du circuit électronique de transmission

Exp. 9: Système numérique de transmission des signaux optiques en infrarouge

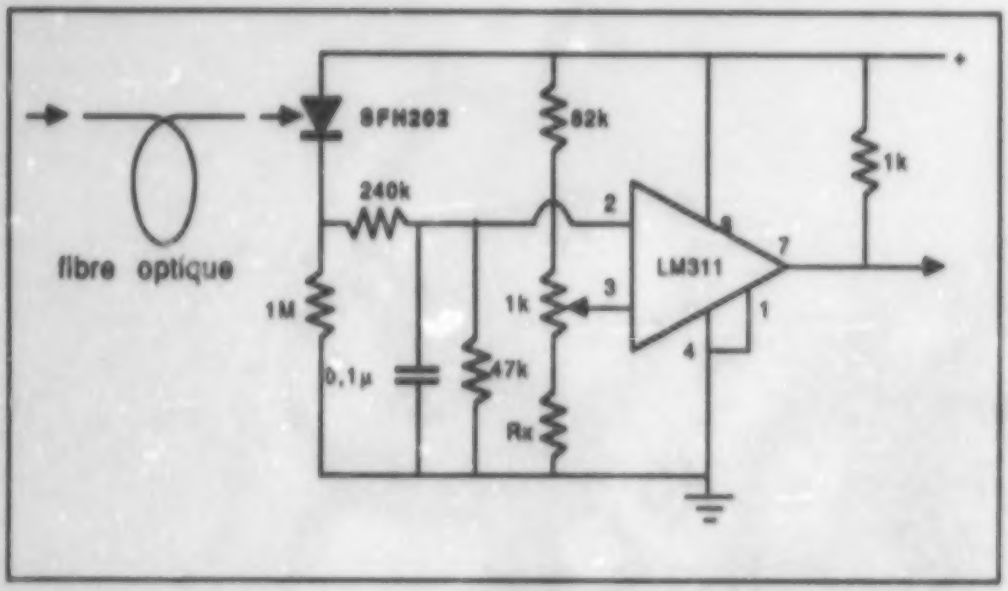


Figure 6

Schéma du circuit électronique de réception

En modifiant la valeur de la résistance à l'aide du potentiomètre P illustré dans la figure 5, on peut simuler les différents trains d'impulsions envoyés par le transmetteur A. La variation de la capacité C_T va permettra quant à elle d'envoyer différents trains par le transmetteur B.

EXPÉRIENCE

1. Montez le système de transmission selon la figure 7, en utilisant les câbles optiques munis de connecteurs.

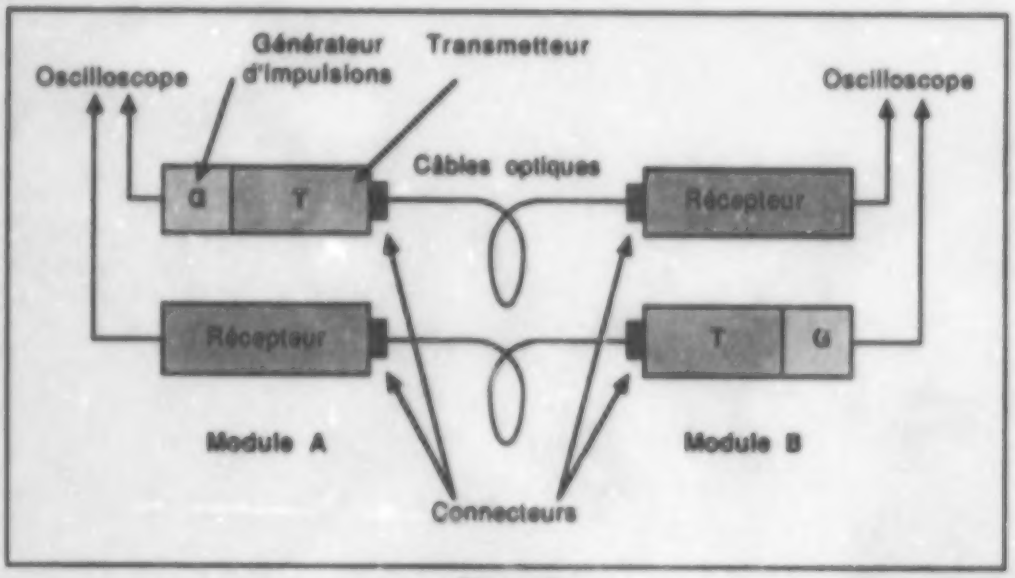


Figure 7

Schéma du montage expérimental pour la transmission de signaux numérique en infrarouge

2. Branchez l'alimentation TTL : +5V DC.

3. À l'aide de l'oscilloscope, vérifiez la présence du signal à l'entrée de la section générateur du transmetteur et à la sortie du récepteur de chaque module.

4. En utilisant les potentiomètres P et C, simulez les cinq différents trains d'impulsions véhiculés dans chacune des deux lignes de transmission.

5. En utilisant l'oscilloscope, calculez le nombre de bits envoyés pour chaque train d'impulsions simulé par le système.

6. En manipulant les connecteurs, observez l'influence du mésalignement « fibre-source » ou « fibre-détecteur » sur les propriétés de transmission du système.

QUESTIONNAIRE

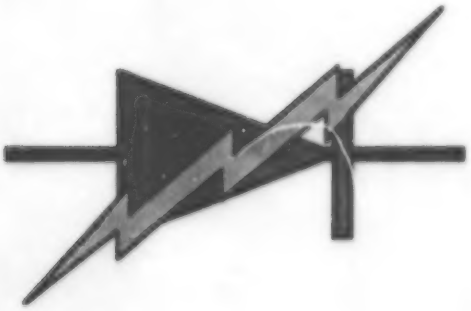
1. Expliquez les principes de fonctionnement de ce système de transmission optique.

2. Qu'est-ce que le multiplexage temporel ?

3. Comment peut-on augmenter la capacité en bit/s d'un système de transmission optique ?

4. Quels sont les paramètres qui déterminent la qualité du couplage « fibre-source » et « fibre-détecteur de la lumière » ?

LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE



Centre III

Expérience 10

Simulation de la modulation numérique de la lumière visible

SIMULATION DE LA MODULATION NUMÉRIQUE DE LA LUMIÈRE VISIBLE

Objectifs:

1. Étude de la modulation directe de la lumière visible
2. Étude des composantes d'un système de communication
3. Simulation de fonctionnement d'un système numérique de télécommunication

Matériel:

1. Transmetteur optique Hirschmann
2. Récepteur optique Hirschmann
3. Câble optique Hirschmann connectorisé OKE-200
4. Simulateur
5. Alimentation TTL +5V DC
6. Oscilloscope

INTRODUCTION

Le système de transmission par fibres optiques le plus simple est constitué d'au moins 3 éléments:

- Le transmetteur optique, qui génère les impulsions lumineuses selon le signal de commande;
- La fibre optique, qui agit comme milieu de transmission; et
- Le récepteur optique, dans lequel on procède à une conversion des signaux optiques en signaux électroniques.

La méthode de modulation la plus simple, soit la modulation directe, est possible lorsqu'on utilise une source à semiconducteurs (DL ou DEL). Le signal à transmettre commande directement la source optique (voir figure 1) et module l'intensité de la lumière émise. Le dispositif peut fonctionner soit en mode numérique (courant inférieur au courant de seuil: pas d'émission → 0 logique; courant supérieur au courant de seuil: émission → 1 logique), soit en mode analogique. Dans ce dernier cas, l'intensité de la lumière peut être modifiée en fonction du courant, lequel doit être supérieur au courant de seuil.

Le principe de la conversion du signal analogique en un train d'impulsions numériques est illustré par la figure 2. Le signal temporel est échantillonné à des intervalles réguliers, à un rythme 2 fois supérieur à sa fréquence la plus élevée. Après quoi, les échantillons contiendront toute l'information du signal initial. L'amplitude des échantillons est alors mesurée, puis remplacée par sa valeur la plus proche en numérotation binaire. Chaque niveau de quantification est représenté par un nombre binaire de 8 chiffres, traduit en impulsions électriques et, finalement, transformé en impulsions optiques tout-ou-rien. Pour augmenter le nombre de canaux téléphoniques véhiculés par une seule fibre, on procède au multiplexage temporel.

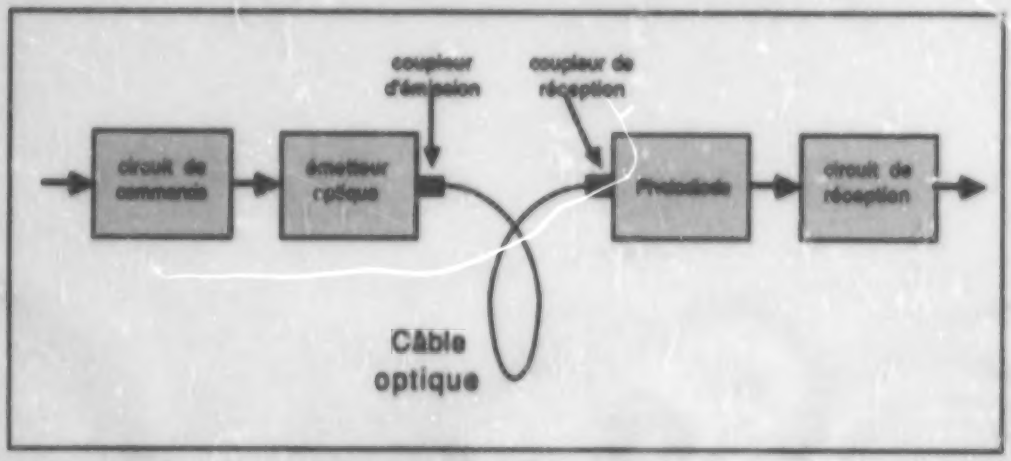


Figure 1

Représentation schématique d'un système de transmission par fibre optique

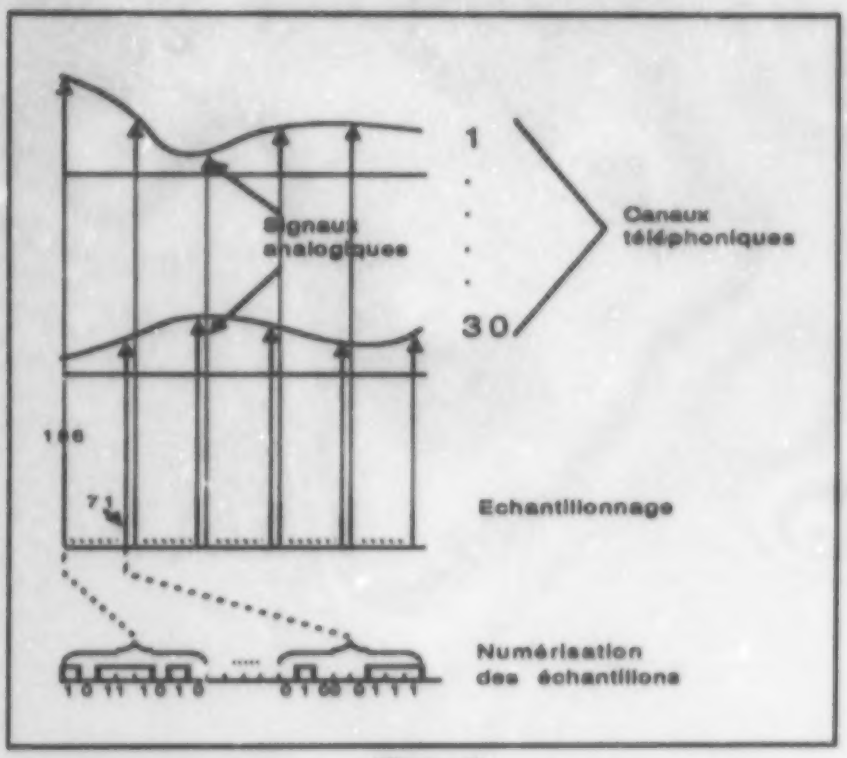


Figure 2

Schéma représentant les étapes dans la numérisation d'un signal analogique

Exp. 10: Simulation de la modulation numérique de la lumière visible

Dans cette expérience, la simulation numérique directe se fait en contrôlant l'illumination d'une diode DEL par des impulsions de basse et de haute fréquence, ainsi que par des paquets d'impulsions.

Le système de simulation, dont le schéma électronique est illustré par la figure 3, contrôle le transmetteur, qui émet les signaux optiques véhiculés par le guide d'ondes optiques OKE-200. Ces signaux sont par la suite reconvertis par le récepteur en signaux électroniques, puis visualisés à l'aide d'un oscilloscope.

Les trois sorties S1, S2 et S3 du simulateur correspondent à ses trois modes de fonctionnement. En connectant S2 avec le transmetteur, on peut commuter manuellement le courant de commande de la diode DEL (à l'aide du bouton P). Dans la position S3, on génère des impulsions de basse fréquence, observables à l'œil nu ou à l'aide d'un oscilloscope. La position S3 permet de générer l'émission d'impulsions de haute fréquence regroupées dans des paquets périodiques.

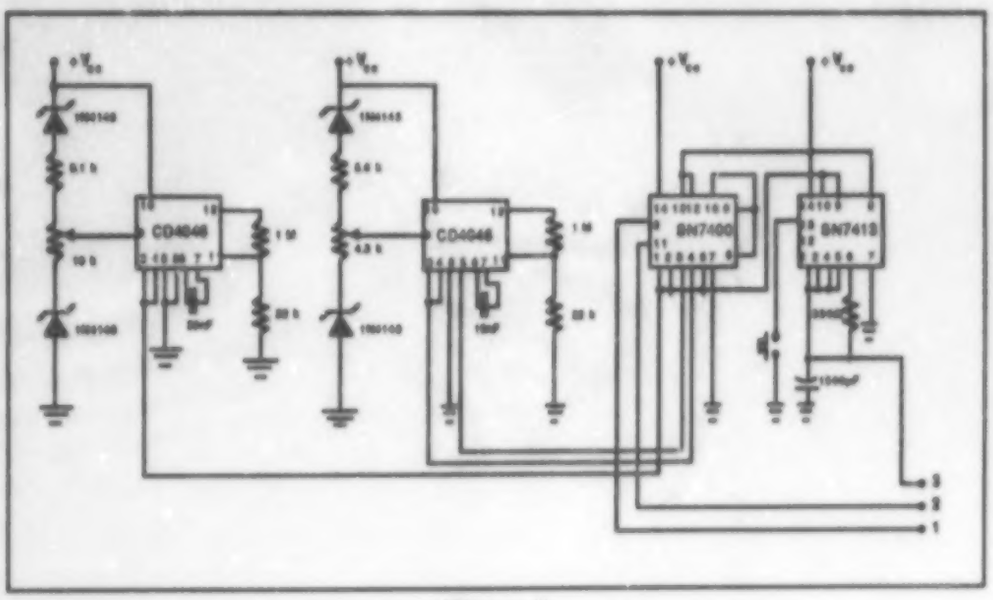


Figure 3

Diagramme du circuit électronique utilisé pour la simulation de la modulation numérique

Exp. 10: Simulation de la modulation numérique de la lumière visible

EXPÉRIENCE

1. Montez le système de transmission selon la figure 4, en utilisant les câbles optiques munis de connecteurs.

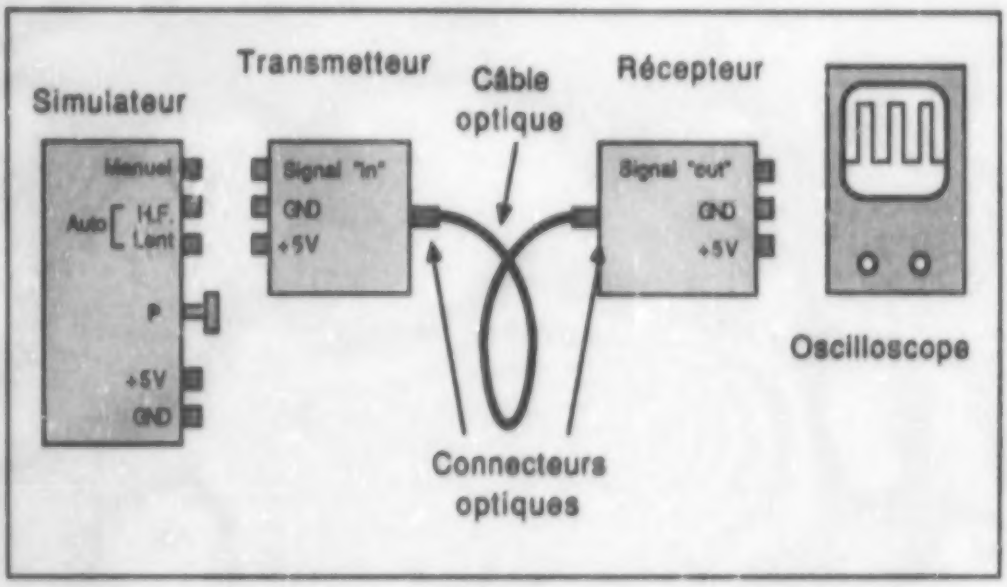


Figure 4

Montage du système expérimental pour la simulation de la modulation numérique de la lumière visible

2. Branchez l'alimentation TTL +5V DC

3. Mettez le système en marche en connectant la sortie S2 avec le transmetteur. Observez la modulation manuelle de la lumière, effectuée à l'aide du bouton P.

4. Connectez la sortie S3 du simulateur avec le transmetteur. Branchez l'oscilloscope sur le récepteur pour observer sa réponse. Changez les composantes R et C de façon à ajuster la fréquence du générateur à une fréquence entre f = 60 Hz et f = 500 Hz. Observez la forme des impulsions sur l'oscilloscope.

5. Connectez la sortie S1 du simulateur avec le transmetteur. En modifiant la résistance avec le potentiomètre P, générez 5 différents paquets d'impulsions. Mesurez les paramètres temporels de ces paquets.

Questionnaire

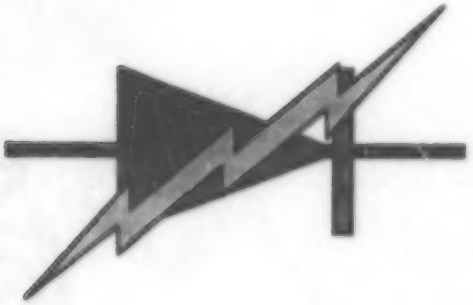
1. Expliquez les fonctions des éléments constitutifs d'un système simple de télécommunication.

2. Quel est le principe de modulation directe de la lumière?

3. Expliquez l'élaboration du signal analogique en un train d'impulsions numériques.

4. Que faut-il faire pour augmenter la quantité d'informations transmises par un système de transmission donné?

LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE



Centre III

Démonstration 1

Liaison téléphonique duplex en fibres optiques

LIAISON TÉLÉPHONIQUE DUPLEX EN FIBRES OPTIQUES

Objectif:

Démonstration expérimentale du fonctionnement d'une ligne téléphonique en fibres optiques.

Matériel:

1. Câble optique OKE 1000A Hirschmann avec les connecteurs (2)
2. Système d'émission et de modulation avec une diode luminescente CQF-24 de Hirschmann (2)
3. Système de réception et de démodulation utilisant un détecteur SFH-202 de Hirschmann (2)

INTRODUCTION

Le principe de base pour la construction d'une ligne téléphonique en fibres optiques est le phénomène de la modulation directe (analogique) de l'intensité de la lumière émise par une diode luminescente (voir figure 1). Chaque combiné téléphonique comporte un système d'émission et un système de détection, ce qui permet de réaliser une ligne de communication bidirectionnelle, dite ligne duplexe.

La figure 2 représente une ligne de communication unidirectionnelle. Ainsi, le système complet est constitué de deux lignes unidirectionnelles identiques.

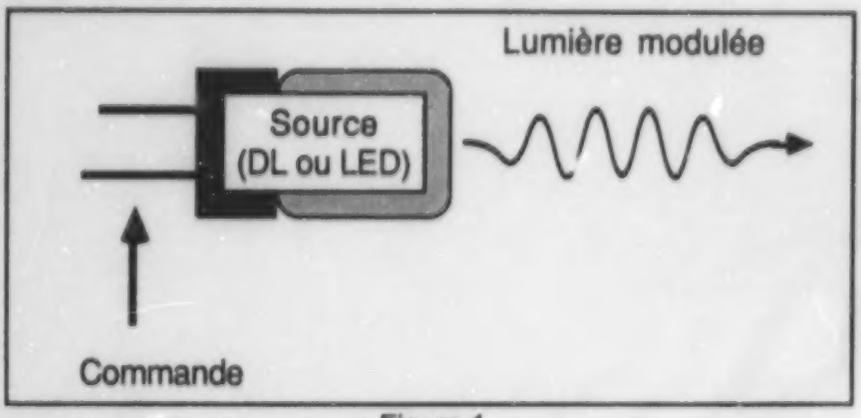


Figure 1

Principe de base de la modulation directe

Le système d'émission (le transmetteur) de la ligne illustrée par la figure 2 est composé d'une diode luminescente et de son système de commande. Ce système, dirigé par le microphone, est capable de moduler analogiquement l'intensité de la lumière émise par la diode, et ce, en fonction de l'intensité et de la fréquence de la voix. Le système de commande est développé autour d'un amplificateur de puissance LM380 ayant une caractéristique compensée en fréquence et une sortie adaptée pour fournir une charge constante de 0,2A. Il assure un

rayonnement de la diode même en l'absence de modulation. La dynamique significative d'amplification des signaux transmis est assurée par le condensateur électrolytique de 1 µF.

Le système de réception est composé de deux étages. Le premier est constitué d'un amplificateur de tension qui reçoit le signal d'une photodiode fonctionnant en régime de photorésistance. La boucle de rétroaction assure la linéarité du système. Dans le deuxième, on retrouve le même amplificateur de puissance LM380 que dans le transmetteur.

Les diodes DEL et les photodétecteurs sont positionnés à l'intérieur de connecteurs qui permettent le branchement et le débranchement rapide et facile des dispositifs avec une fibre optique de transmission. Le système entier est composé de deux modules transmetteur-récepteur, chacun assemblé à l'intérieur d'un combiné téléphonique standard. Une alimentaton extérieure de + 9V DC pouvant fournir un courant de 0,5A est nécessaire pour mettre le système en marche.

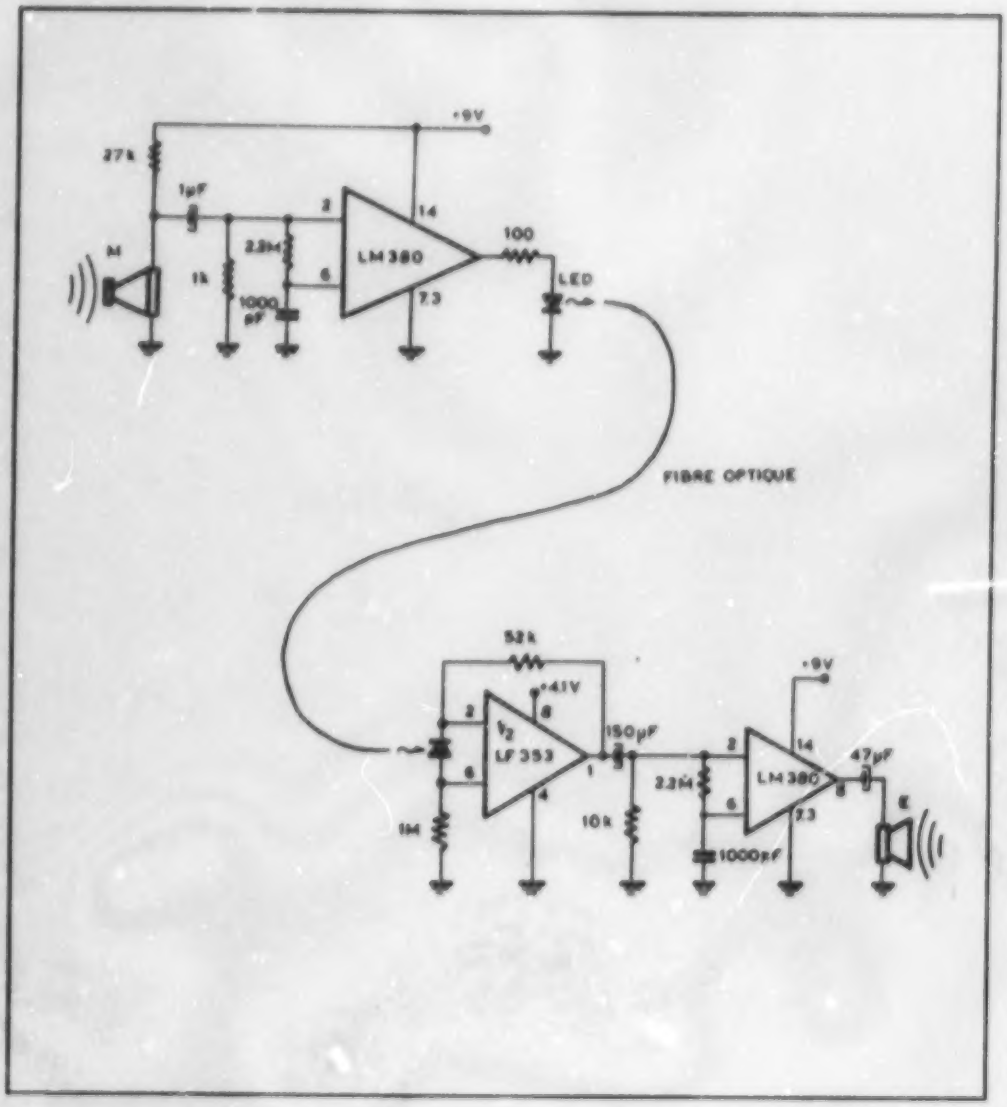


Figure 2

Schéma du circuit électronique utilisé pour établir une liaison téléphonique. À gauche: le circuit d'émission; à droite: le circuit de réception.

Dém. 1: Liaison téléphonique duplex en fibres optiques

LABORATOIRE D'OPTOÉLECTRONIQUE

Centre III

Démonstration 2

Interféromètre Mach-Zender en fibres optiques

INTERFÉROMÈTRE MACH-ZENDER EN FIBRES OPTIQUES

Objectifs:

1. Démonstration expérimentale du phénomène d'interférence de la lumière;
2. Démonstration du fonctionnement d'un capteur interférométrique en fibres optiques dans la configuration Mach-Zender.

Matériel:

1. Laser à He-Ne
2. Coupleurs:
   - une lentille de type GRIN
   - coupleur birectionnel en fibres optiques
   - cube diviseur de lumière
3. Brouilleur de modes
4. Deux coupleurs F-916

INTRODUCTION

Le phénomène d'interférence de la lumière est basé sur l'effet de la superposition des ondes électromagnétiques. L'interférence la plus visible et qui a la plus grande importance pratique est celle qui se produit entre deux ondes cohérentes et correctement polarisées. Si les phases des deux ondes qui interfèrent sont égales, l'onde résultante va avoir une amplitude égale à la somme des deux amplitudes initiales. On parle alors d'une interférence constructive qui se traduit par l'apparition d'une frange brillante

$$E_1 = A \sin (\omega t + \delta_1)$$

$$E_2 = B \sin (\omega t + \delta_2)$$

où A et B sont les amplitudes des ondes,
ω est la fréquence de l'onde
t est le temps
δ est une constante correspondant au déphasage

alors si $\delta_1 = \delta_2 = \delta$, on a:

$$E_1 + E_2 = (A + B) \sin (\omega t + \delta)$$

La figure 1 illustre cette situation.

Par contre, si les deux phases sont opposées et que les amplitudes sont égales, l'amplitude de l'onde résultant de l'interférence sera nulle. On voit alors apparaître une frange sombre. La figure 2 illustre cette situation.

On retrouve l'application pratique du phénomène d'interférence dans le principe du fonctionnement de l'interféromètre optique. Bien que plusieurs configurations différentes

existent pour ce dispositif, on obtient toujours à sa sortie l'image d'interférence de deux ondes ayant parcouru des chemins optiques différents. Une de ces ondes sert de référence, tandis que la deuxième subit un déphasage provoqué par un certain paramètre physique extérieur. C'est en comptant le nombre de franges produites qu'on arrive à mesurer ce phénomène.

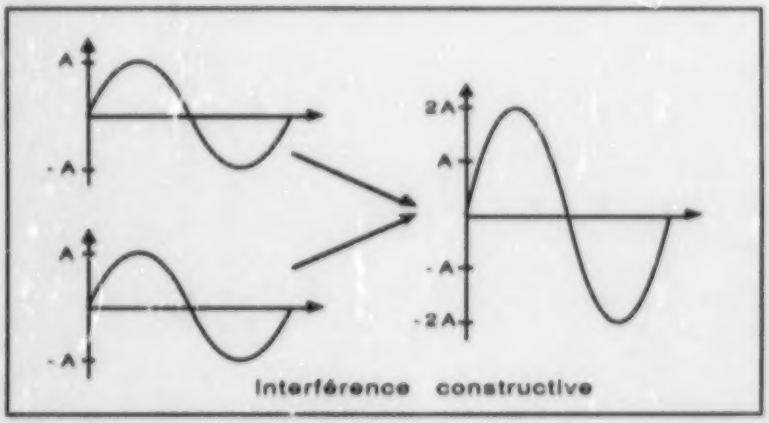


Figure 1

Exemple d'une interférence constructive

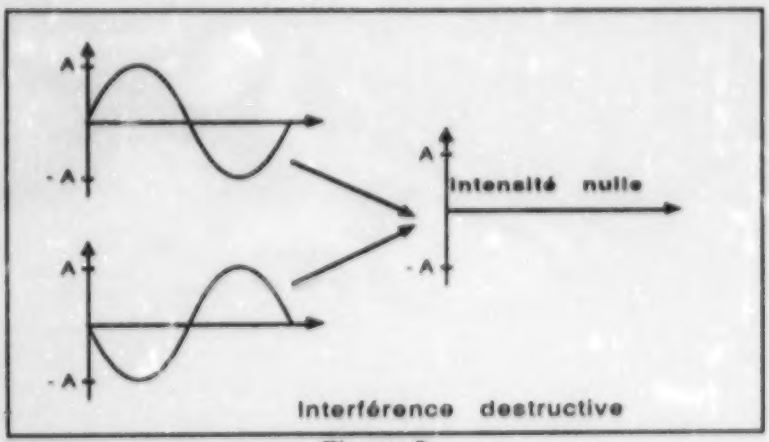


Figure 2

Exemple d'une interférence destructive

La figure 3 illustre l'interféromètre optique dans la configuration Mach-Zender classique. La figure 4 représente une seconde version de cet interféromètre, construite en utilisant les fibres optiques comme milieu de propagation. C'est cette version qui fait l'objet de notre démonstration. Il est intéressant de mentionner que celle-ci est beaucoup plus compacte et moins chère que la version classique. Elle est souvent utilisée pour mesurer très précisément les grandeurs physiques aussi diverses que la distance, la température, la pression, le champ électrique et/ou magnétique, l'accélération, la concentration de produits chimiques etc. Une seule condition doit être satisfaite: le paramètre à mesurer doit être capable de provoquer le déphasage relatif entre les deux ondes parcourant l'interféromètre, en changeant l'indice de réfraction et/ou les dimensions de la fibre qui constitue la branche de mesure.

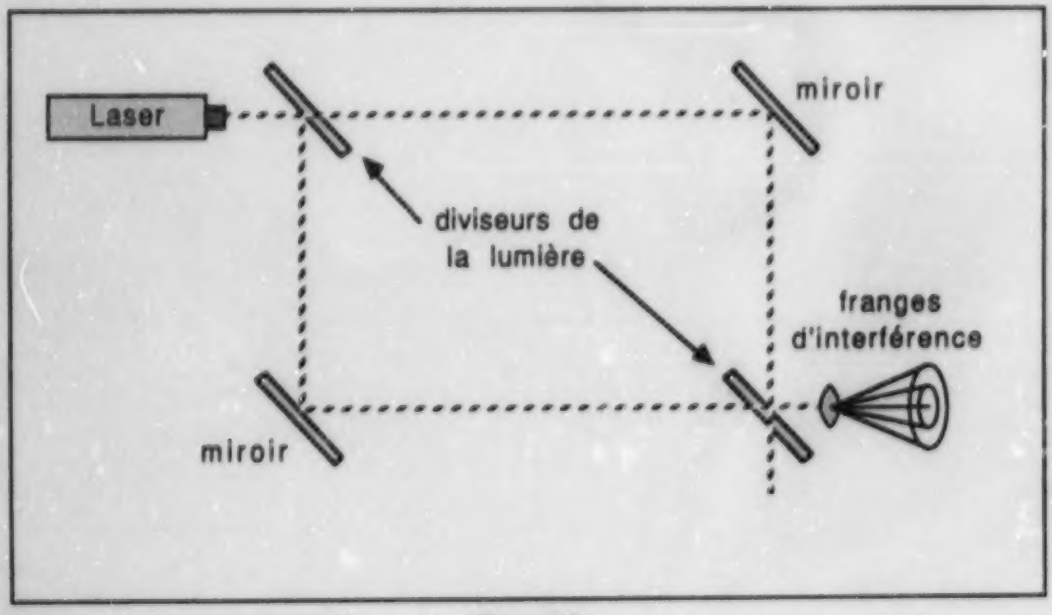


Figure 3

Configuration classique d'un interféromètre Mach-Zender

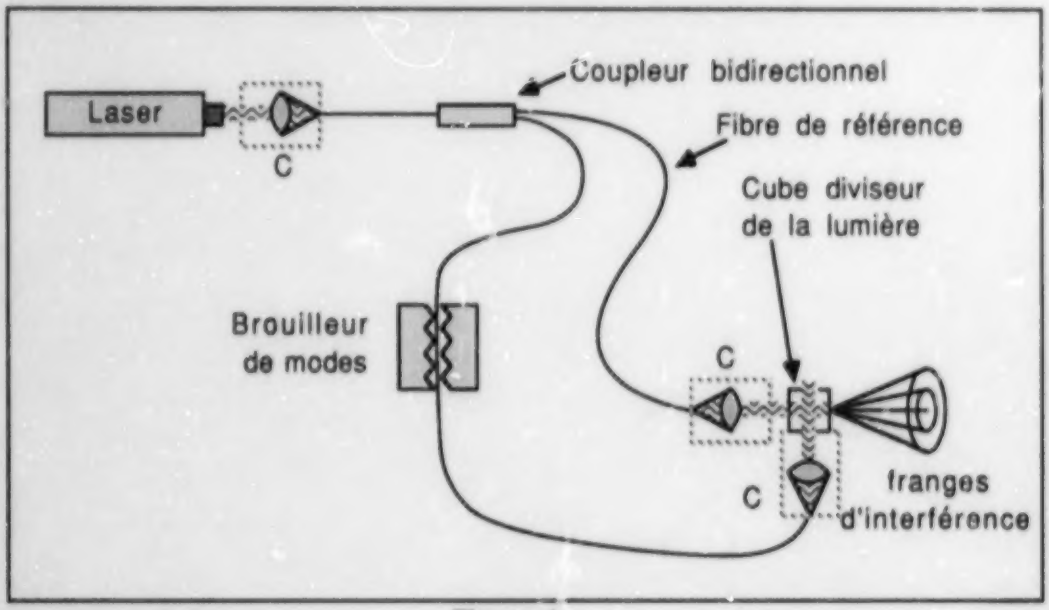


Figure 4

L'interféromètre Mach-Zender en fibres optiques

La configuration illustrée par la figure 4 permet de démontrer deux effets:

1. L'interférence de deux ondes lumineuses à la sortie du diviseur de lumière se manifeste sous forme d'un éclairement et obscurcissement périodique sur l'écran.

2. Le déphasage contrôlé d'une onde peut être obtenu en utilisant le brouilleur de modes afin d'exercer une pression sur la fibre optique. Cette pression change les conditions de propagation dans la fibre et provoque ainsi un déphasage qui pourra être observé sous la forme d'un déplacement des franges d'interférence, simulant le fonctionnement d'un capteur de la pression en fibres optiques.